

An aerial photograph of a coastal town in the Netherlands. The foreground shows a wide, sandy beach with gentle waves lapping at the shore. The middle ground is filled with a dense residential area, featuring a mix of traditional Dutch architecture and modern buildings. The background shows a vast, flat landscape under a clear sky.

Morfodynamica en hydrodynamica van de Hollandse kust

The logo for TU Delft, featuring a stylized leaf icon above the text 'TU Delft'.

TU Delft

Technische Universiteit Delft

Pol van de Rest
MSc Thesis

Morfodynamica en hydrodynamica van de Hollandse kust

Eindrapport MSc Thesis

Afstudeercommissie:

Prof. dr. ir M.J.F. Stive

Ir. ing. E.P.L. Elias

Dr. ir. A.J.H.M. Reniers

Ir. J.G. de Ronde

Student:

Pol van de Rest

polvdrest@hotmail.com

Datum:

Mei, 2004



Technische Universiteit Delft

Faculteit of Civiele Techniek

De foto op de voorkant van dit rapport is afkomstig van de internetsite:
<http://www.kustfoto.nl> en is genomen in de buurt van Egmond aan Zee

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerrapport getiteld "Morfodynamica en hydrodynamica van de Hollandse kust" geschreven door Pol van de Rest. Dit rapport is het verslag van mijn afstudeeropdracht in het kader van de studie Civiele Techniek en Geowetenschappen aan de Technische Universiteit Delft.

Via deze weg wil ik mijn afstudeercommissie; Prof. Marcel Stive, mijn dagelijkse begeleider Edwin Elias, John de Ronde van het RIKZ en Ad Reniers bedanken voor hun bijdrage aan mijn afstudeerrapport. Mijn speciale dank gaat uit naar Edwin Elias (TU Delft) voor de enthousiaste begeleiding en het veelvuldige nalezen en corrigeren van mijn werk. Daarnaast gaat speciale dank uit naar John de Ronde (RIKZ) voor zijn feedback gedurende het onderzoek en het verschaffen van veel nuttige gegevens. Ook wil ik RIKZ bedanken voor het openstellen van hun bibliotheek en het verschaffen van een werkplek, waar ik vrijdag regelmatig verbleef.

Tot slot wil ik mijn ouders, vrienden, studiegenoten en mijn vriendin bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun die ik de afgelopen jaren hebben mogen ontvangen bij het voltooien van mijn studie.

Pol van de Rest
Delft, mei 2004

Samenvatting

In een laaggelegen en dichtbevolkt land als Nederland is het belangrijk om veranderingen van de kust zo goed mogelijk te begrijpen. Begrip van de natuurlijke lange termijn ontwikkeling van het kustgebied is van cruciaal belang om voorbereid te zijn op ongewilde toekomstige ontwikkelingen. Bovendien is inzicht in de effecten op het kustgedrag, na de aanleg van grote civiele constructies en andere menselijke ingrepen, vereist om een juist kustbeleid te kunnen voeren. Morfologische modellen (Delft3D, PonTos) zijn een handig hulpmiddel bij de voorspelling van het kustgedrag. Voor de aansturing, calibratie, validatie en evaluatie van deze morfologische modellen zijn de maatgevende transporten en de hydrodynamica langs de Hollandse kust van essentieel belang. De benodigde gegevens voor het aansturen van deze morfologische modellen komen over het algemeen uit sedimentbudget studies, zoals de studies van Stive (1989) en van Van Rijn (1995). Deze studies geven echter geen eenduidig beeld van de heersende transporten en maatgevende processen. Bovendien zijn deze studies al 10-15 jaar oud. Met behulp van extra meetdata en de huidige kennis toegepast op de verschillende morfologische studies, wordt getracht een eenduidig beeld te vormen van de huidige (2000) hydrodynamica en morfodynamica langs de Hollandse kust.

Uit analyse van extra lange meetreeksen volgt een redelijk eenduidig en overeenkomstig beeld van de hydrodynamica vergeleken met eerdere studies. De variatie van de golven, getij en wind is niet groot langs de Hollandse kust.

Golven: Het golfklimaat op diep water is redelijk constant, waarbij er zuidwaarts een vermindering van golven uit de richting west en noordnoordwest is, samengaand met een kleine vergroting van golven uit de richtingen westzuidwest en noord. De extreme golven zijn hoger bij de noordelijke gelegen stations, door de meer blootgestelde locatie van de noordelijke stations voor noordwesten wind, van waaruit de hoogste golven komen.

Het golfklimaat op ondiep water varieert echter meer langs de kust dan op diep water, door zandbanken, ondieptes en de buitendelta. De buitendelta en de ondieptes voor de Texelse kust werken als een soort golfbreker, waardoor de golfaanval op de kust vanaf Den Helder tot ongeveer de Pettemer Polder (km 20) kleiner is. De invloed op de golfrichtingen is mogelijk nog verder naar het zuiden merkbaar, tot ongeveer km 25, doordat de golven vroegtijdig in relatief ondiep water, waardoor de golven veel diffractie ondervinden en onder een kleine hoek de kust naderen. Hierdoor is er mogelijk een netto golfgedreven stroming richting het noorden (vanaf km 25 tot km 0), die richting Den Helder steeds groter wordt. De bovenstaande hypothese zal echter nog getoetst moeten worden, door middel van golfberekeningen en/of metingen van de stroomsnelheden.

Getij: De getijgolf langs de Hollandse kust verplaatst zich van zuid naar noord en de getijslag neemt richting het noorden geleidelijk af, van 1.75m bij Hoek van Holland en Scheveningen tot 1.4m bij Den Helder. De getij asymmetrie neemt toe richting Den Helder, waardoor de rest stroomsnelheid toeneemt van ongeveer 0.1 m/s tot 0.15 m/s bij Callantsoog (km 14) (Rijkswaterstaat, 1993).

Wind: Het gehele windveld langs de Hollandse kust kan geschematiseerd worden door één representatieve windsnelheid van 6-6.5 m/s en een windrichting van ongeveer 240 graden t.o.v. het noorden. De waarden van IJmuiden liggen beneden de waarden van de andere meetstations (K13, Europlatform), die verder zijn verwijderd van de kust (- 0.5m/s).

Stromingen: De gezamenlijke werking van de golven, wind, getij en dichtheidsgradiënten bepalen de reststromingen, maar zijn niet strikt van elkaar te scheiden, omdat deze elkaar in sterke mate beïnvloeden. Uit metingen bij Egmond volgt dat de cross-shore snelheden over het algemeen gering zijn t.o.v. de longshore snelheden (factor 2-3) (Van Rijn, 2002). De maximale getijde stroomsnelheid in langsricting tijdens vloed (eb) kan met een factor 3 tot 4 vergroot worden door de wind en golfgedreven processen gedurende stormcondities, volgens metingen bij Egmond (Van Rijn, 2002). Metingen bij Noordwijk (km 76) wijzen erop dat de reststromingen in langsricting in de nearshore zone windgedreven zijn (Roelvink et al.,

2001). In het geval van grote rivierafvoeren heeft de windgedreven stroming nog meer invloed. De verticale bijdrage van de reststroming in dwarsrichting wordt grotendeels bepaald door estuaria-achtige dichtheidsgedreven circulatie, die iets gematigd door de cross-shore wind stress, consistent met het down-welling patroon.

Om een eenduidiger beeld van de morfodynamica te vormen zijn (naast de hydrodynamica) de sedimentbudget studies van Stive (1989) en Van Rijn (1995) met elkaar vergeleken. Hieruit bleek dat er grote verschillen tussen beide studies zijn ontstaan door het gebruik van verschillende calibratie volumes, de processen die worden meegenomen, kwantificering van kustontwikkelingen, verschillende hoogten van het actieve profiel, verschillende bovengrenzen en grenzen in langsrichting van de beschouwde secties, andere processen als sluitingsvolume en een verschillende definitie van dwarstransport.

Bij vergelijking van de gebruikte calibratie volumes tussen de studie van Stive (JARKUS data 1965-1985 en trendanalyses 1850-1985) en Van Rijn (JARKUS data 1964-1992) blijkt dat trends uit de studie van Stive waarschijnlijk niet representatief meer zijn voor de huidige kustontwikkelingen, door de vele menselijke ingrepen en mogelijk een kleine verandering van omgevingscondities. De calibratie volumes uit de studies van Van Rijn wijken echter ook af van de volumes uit recentere studies (Groenendijk, 1997, Stam, 1999). Door de vele menselijke ingrepen na 1960 is in de omgeving van deze ingrepen (voornamelijk bij havendammen) waarschijnlijk een trendverandering opgetreden, waarvan het effect langzaam af aan het nemen is, zoals waarneembaar is bij het Kennemerstrand (km 56-60).

In de studie van Stive zijn de suppletie -en bagger volumes verwaarloosd, waardoor 255.000 m³/jaar te weinig is meegenomen in de zandbalans. Van Rijn heeft het zeespiegelrijzings-effect verwaarloosd; maar omdat dit als een herverdelingsproces over het dwarsprofiel wordt beschouwd is de fout die hierdoor ontstaat klein.

De processen in de zandbalans in de studie van Van Rijn zijn gekwantificeerd vanuit volumeveranderingen en in de studie van Stive via kustlijnverplaatsingen. De voorkeur ligt echter bij volumeveranderingen, omdat de zandbalans dan makkelijker te corrigeren is voor suppletievolumes en de trend van de kustontwikkeling dan betrekking heeft over het gehele dwarsprofiel.

Stive gebruikte het langstransport als sluitingsvolume van de zandbalans en Van Rijn het dwarstransport over de -8m dieptelijn. Het dwarstransport over de -8m dieptelijn kan het beste als sluitingsvolume van de zandbalans worden genomen, omdat dit de grootste onzekerheid blijkt te zijn in de zandbalans.

Het verschil in dwarstransport over de -8m dieptelijn tussen beide studies is bij de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland veroorzaakt door een verschillende definitie van dwarstransport. Langs de rest van de Hollandse kust komt het verloop van het dwarstransport redelijk overeen, al bestaat er wel een kwantitatief verschil van 5-10 m³/m/jaar.

Indien de langstransport waarden uit de studie van Van Rijn aangepast worden, door te corrigeren voor recentere trendontwikkelingen, komen de transporten ten zuiden van IJmuiden goed overeen met het langstransport uit de studie van Stive. Van Rijn lijkt langs de Zuid-Hollandse kust het langstransport overschat te hebben. Langs de Noord-Hollandse kust blijven er grote verschillen bestaan.

Na vergelijking en analyse van de studie van Stive en Van Rijn zijn de transportwaarden vergeleken met andere studies, zoals PonTos (1999) en Roelvink (2001). Hieruit blijkt dat:

- Het langstransport in de brandingszone en het dwarstransport over de -8m dieptelijn bepalen grotendeels de kustontwikkeling langs de Hollandse kust. Het dwarstransport over de +3m/duinvoet en het zeespiegelrijzings-effect zijn minder belangrijk.
- Dwarstransport over de -8m dieptelijn is de grootste onzekerheid in de zandbalans van de Hollandse kust. Dit wordt veroorzaakt door de grote gevoeligheid voor de verschillende parameters die het langstransport bepalen en de relatief kleine transportwaarden (echter over

een grote lengte in langsrichting. Uit de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn (1995) volgt dat het dwarstransport over de -8m dieptelijn bestaat uit een kustwaarts gerichte component, die wordt veroorzaakt door het Longuet-Higgins stromingseffect, asymmetrie in golfsnelheden en dichtheidsgradiënten. Netto zeewaarts gerichte transporten worden veroorzaakt door lange golfeffecten en de undertow. Relatief fijn zand resulteert in zeewaarts transport en relatief grof zand in kustwaarts transport.

- De betrouwbaarheid van de langstransport gradiënten in de brandingszone (NAP +3m/-8m) is langs de Zuid-Hollandse kust groter dan langs de Noord-Hollandse kust. In de buurt van de havendammen van IJmuiden en richting het Marsdiep is het langstransport moeilijk te kwantificeren en is de onzekerheid het grootste. De omvang van de effecten van strandhoofden en palenrijen is niet geheel duidelijk, maar wordt verondersteld het lanstransport met ongeveer 50% te verminderen. Het langstransport in de brandingszone blijkt over vrijwel de gehele lengte van de kust invloed te ondervinden van de aanwezige constructies. Volgens de gevoeligheidsberekeningen uit de studie van Van Rijn wordt het langstransport in de brandingszone vooral bepaald door het golfklimaat (en de daarmee samenhangende kustlijnoriëntatie), de dieptegemiddelde langsstroming, de aanwezigheid van brekerbanken, de bodemhelling en de korreldiameter. De wind en het getij blijken minder effect te hebben op het totale geïntegreerde langstransport in de brandingzone, doordat het meeste langstransport dicht bij de kust plaatsvindt en golfgedreven is. Op de -8 en -20m dieptelijn is het effect van wind en getij echter wel groot.
- Er is weinig bekend van de transporten op dieper water (NAP -8/-20m).
- In alle studies die de transporten beschouwen wordt aangenomen dat suppleties geen invloed hebben op de transporten in de kustzone, ondanks de grote input van ongeveer 2-3 Mm³/jaar in het kuststelsel.

Uiteindelijk ontstaat het volgende beeld van het langstransport langs de Hollandse kust (zie Figuur 9-3): Vanaf Hoek van Holland richting Scheveningen neemt het netto langstransport toe van nul tot een waarde van ongeveer 120.000 m³/jaar. Ten noorden van Scheveningen (km 98) neemt de langstransport gradiënt over een korte afstand toe ten opzichte van de aanliggende sectie, doordat er geen strandhoofden meer aanwezig zijn. De kustlijnoriëntatie t.o.v. het noorden wordt daarna minder, waardoor de langstransport gradiënt geleidelijk zal verminderen tot Noordwijk (km 75). Vanaf Noordwijk wordt verondersteld dat het langstransport invloed ondervindt van de havendammen van IJmuiden, waardoor het langstransport toeneemt tot een waarde van 200.000 m³/jaar. Langs –en dwarstransport is richting de havendammen moeilijk te scheiden en daardoor onzeker. Het netto langstransport direct ten noorden van de havendammen is zuidwaarts gericht en neemt toe tot een waarde van ongeveer 100.000 m³/jaar. Bij Egmond (km 40) wordt het netto langstransport weer noordwaarts gericht. Van Egmond richting Den Helder neemt het langstransport geleidelijk toe tot 400.000 m³/jaar. Het netto langstransport richting Den Helder is erg onzeker, omdat de invloed van de buitendelta en de Waddenzee zeer complex is en er weinig bekend is over de achterliggende processen.

Het dwarstransport over de NAP -8m dieptelijn is redelijk constant langs de Hollandse kust (zie Figuur 9-4). Het jaarlijkse gemiddelde netto dwarstransport is kustwaarts gericht en is circa 0 tot 6 m³/m/jaar. Vanaf Hoek van Holland richting IJmuiden vermindert het dwarstransport door een langzaam verminderde dichtheidsgradiënt. Het ondiep water golfklimaat is niet constant langs de kust door de aanwezigheid van de buitendelta (zie paragraaf 4.5.2.). Daardoor zal waarschijnlijk het dwarstransport in de sectie vanaf de Pettemer Polder (km 20) tot Den Helder aanzienlijk afwijken van de andere kustsecties. Het is echter moeilijk aan te geven hoe het dwarstransport in deze sectie eruit ziet, zonder aanvullende modelberekeningen. Bij de havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden zijn er grote pieken in het dwarstransport, indien er een meebewegend assenstelsel wordt toegepast (paragraaf 9.4.3.2). Door de convergentie en divergentie van de stroomlijnen om de havendammen ontstaat ten zuiden van de havendammen een zeewaarts dwarstransport en ten noorden een kustwaarts dwarstransport.

Uit deze studie zijn de volgende aanbevelingen voor toekomstig onderzoek naar voren gekomen:

- Wat zijn de effecten van suppleties op de transporten na 1990?;
- Het langtransport vanaf havendammen van IJmuiden richting Den Helder en het dwarstransport vanaf de Pettemer Polder tot Den Helder;
- Transporten en kustontwikkeling op dieper water (NAP-8/-20m);

Inhoudsopgave

VOORWOORD

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVE

BIJLAGEN

LIJST MET FIGUREN

LIJST MET TABELLEN

1	INLEIDING	1
1.1	PROBLEEMOMSCHRIJVING	1
1.2	DOELSTELLING.....	1
1.3	OPZET VAN DE STUDIE	2
2	RANDVOORWAARDEN	3
2.1	GEBIEDSAFBAKENING	3
2.2	PROBLEMEN VOOR DE TOEKOMST	4
2.3	HET MORFOLOGISCHE SYSTEEM.....	4
2.4	TIJD -EN RUIMTESCHALEN	5
2.5	SEDIMENTTRANSPORT.....	6
2.6	KUSTMETINGEN	8
2.7	KUSTBELEID.....	8
3	GEBIEDSBESCHRIJVING.....	10
3.1	ZANDGEGEVENS.....	10
3.2	MORFOLOGIE	10
3.3	SEDIMENTATIE/ EROSIË PATRONEN.....	14
3.3.1	<i>Ondiepe kustzone (NAP +3/-8m)</i>	14
3.3.2	<i>Diepe kustzone (NAP -8/-12m)</i>	20
3.4	ZANDVRAAG VAN DE WADDENZEE.....	21
3.5	INDELING ZONES LANGS DE KUST MET VERSCHILLENDE KUSTGEDRAG	22
3.6	CIVIELE CONSTRUCTIES	23
3.7	SUPPLETIES, BAGGEREN, DUMPING	25
3.8	RIVIERINVLOEDEN	26
4	GOLVEN	27
4.1	INLEIDING	27
4.2	HET METEN VAN GOLVEN.....	27
4.2.1	<i>Meetlocaties</i>	27
4.2.2	<i>Meetmethoden</i>	27
4.2.3	<i>Verwerking meetresultaten</i>	28
4.3	GOLFHOOGTE VERDELING OVER HET JAAR.....	29
4.4	GOLFHOOGTE VERDELING PER RICHTING	30
4.5	GOLFKLIMAAT VARIATIES LANGS DE KUST	31
4.5.1	<i>Variatie langs de kust</i>	31
4.5.2	<i>Effect van bodemdpte op het golfklimaat</i>	33
4.6	VERANDERING VAN GOLFKLIMAAT IN DE TIJD	34
4.7	LAAGFREQUENTE GOLVEN (DEINING)	36
4.8	WINDINVLOEDEN	37
4.9	GOLFPERIODEN	37
5	GETIJ.....	39
5.1	MEETLOCATIES	39
5.2	UITLEG GETIJ	39
5.3	VOORSPELLING VAN HET GETIJ	40
5.4	VERTICAAL GETIJ	42
5.5	GETIJ ASYMMETRIE.....	44
5.6	VERANDERINGEN IN DE TIJD	49

6	WIND	50
6.1	INLEIDING	50
6.2	MEETSTATIONS	50
6.3	KARAKTERISTIEKEN WINDKLIMAAT.....	51
6.3.1	<i>Windsnelheden</i>	51
6.3.2	<i>Windrichtingen</i>	51
6.4	STORMEN	52
6.5	WIND SET-UP.....	54
6.6	VERANDERINGEN IN DE TIJD	54
6.7	MODELLERING VAN WIND	55
6.8	DROOG ZANDTRANSPORT DOOR WIND	57
7	STROMINGEN	58
7.1	INLEIDING	58
7.2	GOLF-GERELATEERDE STROMINGEN	60
7.2.1	<i>Stroming in langsrichting</i>	60
7.2.2	<i>Stroming in dwarsrichting</i>	62
7.3	GETIJ-GERELATEERDE STROMINGEN	64
7.4	WIND-GERELATEERDE STROMINGEN.....	66
7.5	REST STROMINGEN.....	66
8	VERGELIJKING SEDIMENTBUDGET STUDIES	68
8.1	INLEIDING	68
8.2	SAMENVATTING STIVE.....	68
8.3	SAMENVATTING VAN RIJN.....	73
8.4	VERGELIJKING STUDIES STIVE EN VAN RIJN	81
8.4.1	<i>Inhoud en opzet van de modellen</i>	81
8.4.2	<i>Calibratie volumes</i>	82
8.4.3	<i>Processen</i>	86
8.4.3.1	<i>Langtransport</i>	86
8.4.3.2	<i>Dwarstransport over de -8m en -20m lijn</i>	87
8.4.3.3	<i>Brontermen</i>	89
8.4.3.4	<i>Dwarstransport over de +3m lijn/ duinvoet</i>	90
8.5	AANPASSING LANGSTRANSPOORT WAARDEN VAN RIJN	91
9	LANGS -EN DWARSTRANSPOORT	93
9.1	INLEIDING	93
9.2	OVERZICHT LANGSTRANSPOORT UIT ANDERE STUDIES.....	93
9.3	PROCESSEN DIE HET LANGSTRANSPOORT BEÏNVLOEDEN	95
9.3.1	<i>Gevoeligheidsberekeningen</i>	95
9.3.2	<i>Golfgedreven langtransport</i>	96
9.3.3	<i>Windeffect op langtransport</i>	97
9.3.4	<i>Langtransport door getij</i>	97
9.3.5	<i>Langtransport door dichtheidsgedreven stroming</i>	97
9.3.6	<i>Invloed constructies op het langtransport</i>	98
9.4	OVERZICHT DWARSTRANSPOORT UIT ANDERE STUDIES.....	98
9.5	PROCESSEN DIE HET DWARSTRANSPOORT BEÏNVLOEDEN	99
9.5.1	<i>Gevoeligheidsberekeningen</i>	99
9.5.2	<i>Windeffect op dwarstransport</i>	100
9.5.3	<i>Dwarstransport door dichtheidsgedreven stroming</i>	101
9.5.4	<i>Invloed constructies op het dwarstransport</i>	101
9.6	HUIDIGE MORFOLOGISCHE BEELD	101
9.6.1	<i>Langtransport in de zone NAP +3m tot NAP-8m</i>	101
9.6.2	<i>Dwarstransport over de -8m dieptelijn</i>	103
10	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	104
10.1	CONCLUSIES.....	104
10.2	AANBEVELINGEN	106

Bijlagen:

- BIJLAGE 1: OVERZICHT ZANDSUPPLETIES EN BAGGERVOLUMES HOLLANDSE KUST IN DE PERIODE 1953-2001
- BIJLAGE 2: GOLFHOOGTE EN -PERIODEVERDELING PER WINDRICHTING
- BIJLAGE 3: TRANSPORT FORMULES
- BIJLAGE 4: AFLEIDING FORMULES STIVE EN EYSINK
- BIJLAGE 5: KWANTITATIEVE VERGELIJKING STIVE EN VAN RIJN
- BIJLAGE 6: VERGELIJKING VOLUME VERANDERINGEN STIVE EN VAN RIJN
- BIJLAGE 7: ZEESPIEGELRIJZINGSEFFECT
- BIJLAGE 8: JAARLIJKS GEMIDDELDE LANGSTRANSPOORT WAARDEN IN DE BRANDINGSZONE ZONDER EN MET DE AANWEZIGHEID VAN CONSTRUCTIES (VAN RIJN, 1995)

Lijst met figuren

Figuur 2-1: Situatieschets Hollandse kust	3
Figuur 2-2: Schematisatie van het morfologische systeem (TAW, 1995).....	5
Figuur 2-3: Sedimenttransport in langs -en dwarsrichting	6
Figuur 2-4: Overzicht van hydrodynamische processen in de kustzone (Stive et al., 1990).....	7
Figuur 3-1: Korreldiameter verdeling langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995).....	10
Figuur 3-2: Geomorfologie van de Hollandse kust (Wijnberg, 1995).....	11
Figuur 3-3: Verloop van dieptelijnen langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995).....	12
Figuur 3-4: Oriëntatie van de kustlijn t.o.v. het noorden (Wijnberg, 1995).....	13
Figuur 3-5: Bathymetrie van het zeegat van Texel (Elias, et al., '03).....	13
Figuur 3-6: Vergelijking van waargenomen en gemodelleerde sedimentbalans van de Hollandse kust in $m^3/m/jaar$ (Stive en Eysink, 1989).....	16
Figuur 3-7: Jaarlijkse gemiddelde sedimentatie en erosie volumes (inclusief suppleties) in de cross-shore zones -8/+3 en -8/-12m NAP langs de Hollandse kust in $m^3/jaar$ (van Rijn, 1995).....	17
Figuur 3-8: Verdeling van de kust in negen deelsystemen (Mulder, 2000).....	18
Figuur 3-9: Zandbalans in verschillende dieptezones van de afzonderlijke deelsystemen van de gehele Nederlandse kust over de periode 1965-1995, gecorrigeerd voor de uitgevoerde suppleties, uitgedrukt in bodemhoogte verandering in mm/jaar (Mulder, 2000)	19
Figuur 3-10: Sediment volumeverandering in het bassin in vergelijking met het bassinvolume in 1933 (Elias et al, 2003)	22
Figuur 3-11: Verdeling van de Noord-Hollandse kust naar beïnvloeding van de buitendelta (Elias, et al., 2002).....	22
Figuur 3-12: Overzicht locaties van civiele werken langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995).....	24
Figuur 3-13: Overzicht suppleties langs de Hollandse kust over de periode 1966-2001	25
Figuur 3-14: Overzicht suppletie volumes Hollandse kust (uitgezonderd de 19 Mm^3 van de van Dixhoorn Driehoek) over de periode 1953-2001	26
Figuur 4-1: Overzicht belangrijkste golf meetlocaties langs de Hollandse kust	27
Figuur 4-2: Maandelijkse gemiddelde golfhoogte voor de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden.....	30
Figuur 4-3: Percentage van voorkomen van golven per golfrichting op meetpost IJmuiden verdeelt over 5 golfhoogte klasse.....	31
Figuur 4-4: Jaarlijks gemiddelde golfhoogte (H_{m0}) per richtingssector op de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden.....	32
Figuur 4-5: Frequentie van voorkomen van golfhoogte per golfrichting voor de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden.....	32
Figuur 4-6: Variantiedissipatie langs de Hollandse kust voor golven uit het westen (Mus, 2003)	33
Figuur 4-7: Jaarlijkse gemiddelde golfhoogte voor de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden.....	35
Figuur 4-8: Aantal waarden van H_{m0} over een periode van 3 uur bij meetpost K13, die groter zijn dan respectievelijk 3.0 en 4.5 m.....	35
Figuur 4-9: Richtingsverdeling van laagfrequente golfenergie (0.03-0.10Hz) van de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden (Wijnberg, 1995)	36
Figuur 4-10: Frequentie verdeling van H_{E10} op de meetstations ELD, YM6 ,MPN en EUR	37
Figuur 4-11: Golfperiode uitgezet tegen de golfhoogte	38
Figuur 5-1: Getijdestations langs de Hollandse kust	39
Figuur 5-2: Getijbeweging om de amphidromische punten in de Noordzee (www.getij.nl).....	40
Figuur 5-3: Gemiddelde getijkrommes van Hoek van Holland (a), IJmuiden (b) en Den Helder (c) (Getijtafels, 2004).....	43
Figuur 5-4: Getijslag langs de Hollandse kust (data uit Getijtafels, 2004).....	43
Figuur 5-5: Gemiddeld hoog -en laag water langs de Hollandse kust (data uit Getijtafels, 2004).....	44
Figuur 5-6: Asymmetrieën in de stroomsnelheden voor een maximaal netto sedimentrapport van grof en fijn sediment (met op de horizontale as de tijd in uren en op de verticale as de getij stroomsnelheid in cm/s)	45
Figuur 5-7: Asymmetrie in de getij stromingen door de componenten M2, M4 en M2+M4, met op de horizontale as de tijd in uren en op de verticale as de getij stroomsnelheid in cm/s	46
Figuur 5-8: Getij stromingen en waterhoogtes langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995).....	48
Figuur 6-1: Overzicht meetlocaties windsnelheden -en richtingen	50
Figuur 6-2: Jaarlijkse gemiddelde windsnelheden (in m/s) van de meetstations K13 (1983-2002), Europlatform (1983-2002) en IJmuiden (1952-2001).....	51

Figuur 6-3: Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid (in m/s) per windrichting over de periode 1983-2001	52
Figuur 6-4: Percentage van voorkomen van wind per windrichting over de periode 1983-2001	52
Figuur 6-5: Stormduur verdeling over het de periode 1964-1996 (van Baak, 2002)	53
Figuur 6-6: Representatieve windrichting t.o.v. de tijd, die volgt uit de omzetting van het windklimaat naar wind stress	56
Figuur 6-7: Representatieve windsnelheid t.o.v. de tijd, die volgt uit de omzetting van het windklimaat naar wind stress	56
Figuur 7-1: Schematisatie van relaties tussen verschillende stromingen	58
Figuur 7-2: Stromingsprofielen van golven en getij (de gestippelde lijn is de brekerlijn)	59
Figuur 7-3: Reststroming en sedimenttransport principe	59
Figuur 7-4: Locatie van meetstations Egmond gedurende experimenten (COAST 3D, van Rijn, 2002)	60
Figuur 7-5: Effect buitendelta op golfgedreven stromingen	61
Figuur 7-6: Horizontale circulatie patronen als functie van de hoek van golfval	63
Figuur 7-7: Lange termijn bijdrage van de dwars -en langstransport bij Noordwijk 12 km; positieve waarden zijn respectievelijk noordwaarts en kustwaarts transport (Roelvink, 2001)	67
Figuur 8-1: Schematisatie dwarsprofiel actieve zone	69
Figuur 8-2: Sedimenttransporten (in m ³ /jaar) langs de Hollandse kust volgens Stive	72
Figuur 8-3: Compartimenten en geschematiseerd bedprofiel	75
Figuur 8-4: Sedimenttransporten (in m ³ /jaar) in de kustzone tussen Den Helder en Hoek van Holland (NAP +3/-20m)	78
Figuur 8-5: Volumeverandering vanaf NAP -8m tot duinvoet/NAP +3m t.g.v. langstransport, dwarstransport over de +3m en -8m dieptelijn en suppleties, volgens de studies van Stive en Van Rijn	82
Figuur 8-6: Volumeverandering vanaf NAP -8m tot duinvoet/NAP +3m, exclusief suppleties, volgens de studies van Stive, Van Rijn, waarnemingen en Stive gecorrigeerd voor suppleties	83
Figuur 8-7: Erosie -en sedimentatievolumes (m ³ /jaar) afgeleid van Groenendijk (1997) en Stam (1999)	84
Figuur 8-8: Volumeverandering vanaf NAP -8m tot duinvoet/NAP +3m t.g.v. de som van langstransport en dwarstransport over de -8m dieptelijn, volgens de studies van Stive, Van Rijn en gecorrigeerde waarnemingen	85
Figuur 8-9: Vergelijking langstransport (m ³ /jaar) Stive en Van Rijn	86
Figuur 8-10: Vergelijking dwarstransport (m ³ /m/jaar) over de -8m dieptelijn van Stive en Van Rijn	88
Figuur 8-11: Effect van vast assenstelsel (component x,y) en meebewegend assenstelsel (component u,v) op transportcomponenten	89
Figuur 8-12: Overzicht suppletievolumes Hollandse kust over de periode voor en na 1990 (uitgezonderd de 19 Mm ³ van de van Dixhoorn Driehoek)	90
Figuur 8-13: Vergelijking jaarlijkse netto gemiddelde langstransport (*10 ³ m ³ /jaar) in de brandingszone volgens Stive, Van Rijn en aangepaste langstransport waarden van Van Rijn; de ovalen geven de gebieden aan waar het langs -en dwarstransport niet meer strikt te scheiden zijn	91
Figuur 9-1: Jaarlijks gemiddelde langstransport waarden (m ³ /jaar) in de brandingszone volgens verschillende studies en huidige studie	94
Figuur 9-2: Vergelijking dwarstransport waarden Stive, van Rijn, PonTos en Bakker et al	99
Figuur 9-3: Huidige beeld jaarlijkse gemiddelde netto langstransport geïntegreerd over de zone NAP+3 tot NAP -8m (m ³ /jaar)	102
Figuur 9-4: Huidige beeld netto jaarlijkse gemiddelde dwarstransport over de NAP-8m dieptelijn (m ³ /m/jaar)	103

Lijst met tabellen

Tabel 2-1: Overzicht kustproblemen langs de Hollandse kust voor de komende 50 jaar (2000-2050)....	4
Tabel 2-2: Natuurlijke en menselijke oorzaken en factoren van kust -en kustlijn variaties (Stive et al., 2002)	6
Tabel 3-1: Trends van erosie en sedimentatie gecorrigeerd voor suppleties (Bouwmeester et al., 1994)15	
Tabel 3-2: Bewerkte volumeveranderingen (m ³ /jaar) in de brandingszone van verschillende studies gecorrigeerd voor suppleties (Steetzel, 1999)	18
Tabel 3-3: Zandbalans (Mm ³ /jaar) in verschillende dieptezones over de periode 1965-1995, inclusief de uitgevoerde suppleties (Mulder, 2000)	19
Tabel 3-4: Netto en bruto zandbalans op diep water (NAP-8m tot NAP -12m) van de Hollandse kust (Mulder, 1999)	21
Tabel 3-5: Bewerkte volumeveranderingen (m ³ /jaar) in de zone NAP -7/-8 tot NAP -12/-13m van verschillende studies (Steetzel, 1999)	21
Tabel 3-6: Civiele constructies langs de Hollandse kust met jaar van constructie en afstanden tot Den Helder (bewerkt naar Wijnberg, 1995 en Steetzel, 1999)	24
Tabel 3-7: Suppletie volumes langs de Hollandse kust in de periode 1953-2001	25
Tabel 4-1: Meetmethoden en -perioden van de belangrijkste golf meetlocaties langs de Hollandse kust	28
Tabel 4-2: relatieve standaard afwijking van golfparameters.....	29
Tabel 4-3: Overzicht van golfparameters bij de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden.....	33
Tabel 4-4: Relatieve golfhoogte t.o.v. diep water golfhoogte voor verschillende golfhoogte klassen (persoonlijke communicatie, Elias).....	34
Tabel 4-5: Aantal waarden van H _{m0} over een periode van 3 uur bij meetpost K13, die groter zijn dan respectievelijk 3.0 en 4.5 m.....	34
Tabel 4-6: Extreme waarden van T _{m02} en T _p met frequentie 10 ⁻⁴ (Roskam, Hoekema, 1996).....	38
Tabel 5-1: Amplitudes van de belangrijkste harmonische componenten langs de Hollandse kust, berekend over de periode 1995-1998 (data uit Getijtafels 2004)	41
Tabel 5-2: Gegevens van het getij langs de Hollandse kust (data uit Getijtafels, 2004), alle waarden zijn in cm en relatief t.o.v. NAP.....	44
Tabel 5-3: Effect relatieve faseverschil M2-M4 op netto sedimenttransport van grof en fijn sediment (positief is noordwaarts).....	47
Tabel 5-4: Fases van de belangrijkste harmonische componenten langs de Hollandse kust, berekend over de periode 1995-1998 (data uit Getijtafels 2004).....	47
Tabel 6-1: Percentage van voorkomen per windrichting voor verschillende stormtypes over de periode 1964-1990 (Augustijn, 1990)	54
Tabel 6-2: Lange termijn representatieve windkarakteristieken (Roelvink et al., 2001).....	55
Tabel 6-3: Representatieve windkarakteristieken over de periode 1983-2001	55
Tabel 6-4: Relatie tussen windkracht, windsnelheid en zandtransport als gevolg van stuifprocessen (Adriani & Terwindt, 1974)	57
Tabel 7-1: Percentage van voorkomen van golven per golfrichting en golfhoogte klasse bij IJmuiden	62
Tabel 7-2: Maximale diepte gemiddelde stroomsnelheden met (ZW, 15 m/s) en zonder wind in langs en dwarsrichting volgens het TRIWAQ-model (Rijkswaterstaat, 1993).....	64
Tabel 7-3: Vergelijking gemeten en berekende maximale getijde snelheden in de stations Noordwijk, Zandvoort en Egmond.....	65
Tabel 7-4: Maximale stroomsnelheden in langsrichting door het getij, wind en golfgedreven processen (COAST 3D, van Rijn, 2002).....	65
Tabel 8-1: Invoerwaarden model (+ kustwaarts, noordwaarts; - zeewaarts, zuidwaarts).....	70
Tabel 8-2: Reconstructie kustlijnverplaatsing (in m/jaar) per fysische component.....	71
Tabel 8-3: Schattingen van jaarlijks gemiddelde langstransport waarden in de surfzone (NAP -8/+3m) zonder de aanwezigheid van constructies.....	76
Tabel 8-4: Schattingen van jaarlijks gemiddelde totale transportwaarden op 8 en 20m diepte zonder de aanwezigheid van constructies	76
Tabel 8-5: Verdeling van netto dwars windgedreven zandtransport over de NAP +3m dieptelijn langs de Hollandse kust (in m ³ /jaar)	77
Tabel 8-6: Volumeverandering (m ³ /m/jaar) volgens Stive, Van Rijn en waarnemingen bij IJmuiden, en percentage van volumeverandering waarnemingen (alle gecorrigeerd voor suppleties).....	84
Tabel 8-7: Gradiënten in langs -en dwarstransport (m ³ /m/jaar) volgens Van Rijn en aangepaste waarden langstransport Van Rijn; negatieve gradiënten veroorzaken erosie.....	91

Tabel 9-1: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde langtransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -8m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is noordwaarts (Van Rijn, 1995)	96
Tabel 9-2: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde langtransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -20m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is noordwaarts (Van Rijn, 1995)	96
Tabel 9-3: Langtransport op NAP -8m en -20m volgens PonTos en Van Rijn met en zonder wind (Steetzel, 1999)	97
Tabel 9-4: Vergelijking langtransport waarden ($m^3/m/jaar$) op 8 en 20m diepte bij Noordwijk met en zonder dichtheidsgradiënten, positief is noordwaarts (Van Rijn, 1995; TR 1993; TR 2000)	98
Tabel 9-5: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde dwarstransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -8m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is kustwaarts (Van Rijn, 1995)	100
Tabel 9-6: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde dwarstransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -20m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is kustwaarts (Van Rijn, 1995)	100
Tabel 9-7: Vergelijking dwarstransport waarden ($m^3/m/jaar$) op 8 en 20m diepte met en zonder dichtheidsgradiënten, positief is kustwaarts (Van Rijn, 1995)	101

1 Inleiding

1.1 Probleemomschrijving

In een laaggelegen en dichtbevolkt land als Nederland is het belangrijk om veranderingen van de kust zo goed mogelijk te begrijpen. Begrip van de natuurlijke lange termijn ontwikkeling van het kustgebied is van cruciaal belang om voorbereid te zijn op ongewilde toekomstige ontwikkelingen. Bovendien is inzicht in de effecten op het kustgedrag, na de aanleg van grote civiele constructies en andere menselijke ingrepen, vereist om een juist kustbeleid te kunnen voeren.

Vele studies zijn al verricht naar het gedrag van de Hollandse kust. De opzet van deze studies is de laatste jaren echter veel veranderd. De studies van de begin jaren negentig (Stive en Van Rijn) richten zich voornamelijk op kustvoorspellingen die met analyses van meetgegevens worden gemaakt. Recentere studies zijn meer procesgerichte modelonderzoeken (zoals Steetzel, 1999 en Roelvink, 2001). Deze studies gebruiken morfologische modellen (Delft3D, PonTos), die een handig hulpmiddel zijn bij de voorspelling van het kustgedrag. Deze modellen kunnen simulaties maken van twee -en driedimensionale processen van stroming, golven, sedimenttransport en bodemmorfolgie en de interactie tussen deze processen. Invoering van de juiste randvoorwaarden in het model is daarvoor van essentieel belang. Voor de aansturing, calibratie, validatie en evaluatie van deze morfologische modellen is het van essentieel belang om te weten wat de maatgevende transporten zijn en hoe de hydrodynamica langs de Hollandse kust varieert. Bovendien is het belangrijk om te weten welke processen maatgevend zijn.

De benodigde gegevens voor het aansturen van deze morfologische modellen komen over het algemeen uit sedimentbudget studies, zoals de studies van Stive (1989) en van Van Rijn (1995). Dit zijn de twee meest gebruikte en gerefereerde sedimentbudget studies van de Hollandse kust. Deze studies geven echter geen eenduidig beeld van de heersende transporten en maatgevende processen. Bovendien zijn deze studies al zo'n 10-15 jaar oud. Het laatste decennium is er weer veel onderzoek verricht naar het gedrag van de Hollandse kust. Bovendien zijn er veel extra meetgegevens van kustprofielen, de kustlijnligging en van de hydrodynamica langs de Hollandse kust bijgekomen. Met behulp van deze extra meetdata en de huidige kennis toegepast op de verschillende morfologische studies, wordt getracht een eenduidig beeld te vormen van de huidige transporten en hydrodynamica langs de Hollandse kust.

1.2 Doelstelling

Het *doel van deze afstudeeropdracht* is door middel van een gedetailleerde her-analyse van de verschillende morfologische studies van de Hollandse kust aangevuld met (nieuwe) meetgegevens een eenduidiger beeld te vormen van het huidige morfodynamische en hydrodynamische gedrag van de Hollandse kust.

Om dit doel te kunnen bereiken wordt een profielschets van de Hollandse kust gemaakt vanaf Den Helder tot Hoek van Holland, waarbij de volgende vragen worden beantwoord:

- Wat zijn de (jaarlijkse gemiddelde) transporten (langs -en dwarstransport)?
- Wat is het jaarlijks gemiddelde golf -en wind klimaat?
- Hoe verloopt het getij langs de Hollandse kust?
- Wat zijn de stromingen ten gevolge van wind, getij en golven?
- Wat zijn sedimentatie -en erosiepatronen langs de Hollandse kust
- Wat zijn de randvoorwaarden wat betreft bodemligging, banken en sediment karakter?
- Wat zijn de maatgevende processen per kustsectie, die het kustgedrag beïnvloeden?

1.3 Opzet van de studie

Na deze inleiding volgen in hoofdstuk 2 de randvoorwaarden van de studie. Daarbij komen onder andere naar voren; de belangrijkste processen die spelen in de kustzone, de tijd -en ruimteschalen die van belang zijn en het kustbeleid. In hoofdstuk 3 wordt de morfologie en sedimentatie/erosie patronen langs de Hollandse kust beschreven. Daarnaast worden de belangrijkste menselijke ingrepen, zoals civiele werken en suppleties gegeven die in het verleden zijn uitgevoerd. Vervolgens wordt de hydrodynamica van de Hollandse kust bestudeert, te beginnen in hoofdstuk 4 met het golfklimaat. Daarna wordt het getij en het windklimaat beschreven in respectievelijk hoofdstuk 5 en 6. Belangrijk hierbij is de variatie langs de kust en de mogelijke effecten die daardoor ontstaan. De door de golven, wind, en getij gedreven stromingen worden behandeld in hoofdstuk 7. De combinatie van deze drie bepalen de stromingen, die verantwoordelijk zijn voor de transporten in de kustzone. In het daarop volgende hoofdstuk worden de sedimentbudget studies van Stive (1989) en van Van Rijn (1995) bestudeerd en met elkaar vergeleken. In hoofdstuk 9 worden deze studies ook vergeleken met recentere studies, zoals PonTos (Steetzel, 1999) en Mare (Roelvink, 2001). Met behulp van deze studies aangevuld met de opgedane kennis en inzichten van de voorgaande hoofdstukken wordt vervolgens een beeld gevormd van de huidige (2000) transporten langs de Hollandse kust. In het laatste hoofdstuk volgen de conclusies en aanbevelingen van deze studie.

(bodempelling ca. 1:100 à 1:200), naar de vlakke zeebodem (bodempelling ca. 1:1000). Bij de Hollandse kust ligt deze grens op de -16m dieptelijn. Op de vlakke zeebodem bevinden zich daar wel een aantal onderzeese zandbanken, waarvan de rol als kustverdediging niet helemaal duidelijk is. Daarom wordt hier toch de -20m dieptelijn als ondergrens van het actieve kuststelsel beschouwd. De landwaartse begrenzing wordt in deze studie gevormd door de duinvoet, waar het flauwe strand overgaat in het steile duinbeloop.

2.2 *Problemen voor de toekomst*

De zeekeringen van Nederland hebben van oudsher al een strijd moeten voeren tegen de kracht van het water. In de toekomst zal dit niet veranderen. De relatieve zeespiegelstijging en een verwachte hogere stormfrequentie (die zorgt voor hogere waterstanden en hogere golven) zijn daar de oorzaak van. De komende 50 jaar zullen langs de Hollandse kust naar verwachting vier typen kustproblemen voorkomen op de volgende kustdelen (zie Tabel 2-1).

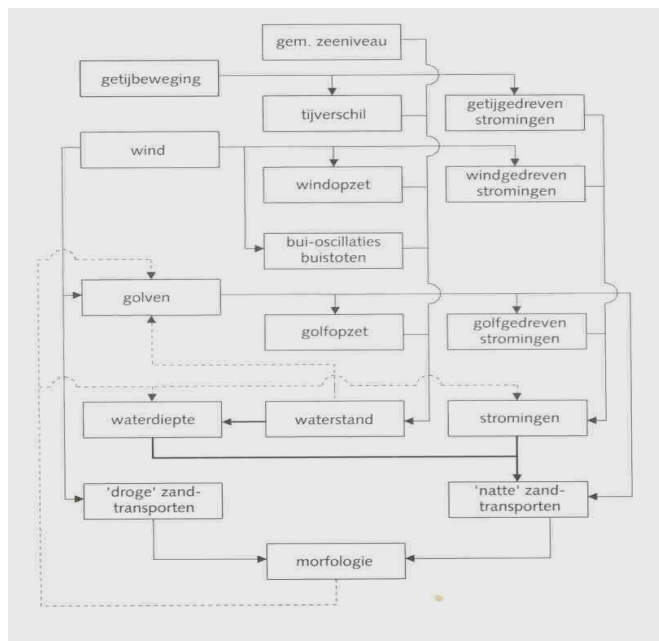
1. Kustlijnhandhaving	<ul style="list-style-type: none"> • kop van Noord -Holland (de termijn is onzeker); • de sluffer bij de Maasvlakte.
2. Veiligheidswaarborging	<ul style="list-style-type: none"> • de smalle duinen bij Callantsoog; • Noordwijk (gedeeltelijk); • Katwijk; • Scheveningen (gedeeltelijk); • het Westland; • de Kop van Goeree nabij de aansluitingen op het Flauwe Werk; • de aansluitingen van de Hondsbossche Zeewering (met name bij het Korfwater).
3. Risicobeheersing	<ul style="list-style-type: none"> • Zandvoort; • Noordwijk; • Katwijk; • Scheveningen; • Kijkduin; • Kennemerstrand.
4. Golfoverslag	<ul style="list-style-type: none"> • Helderse Zeewering; • Hondsbossche Zeewering; • Katwijk ter plaatse uitwateringssluizen; • Flauwe Werk op Goeree; • Scheveningen boulevard

Tabel 2-1: Overzicht kustproblemen langs de Hollandse kust voor de komende 50 jaar (2000-2050)

2.3 *Het morfologische systeem*

Zandtransporten treden op als gevolg van de gezamenlijke werking van golven, stroming en wind. Golven woelen daarbij het zand los van de bodem, waarna het kan worden getransporteerd door een combinatie van golven, wind en getij. De wind zorgt voor de opwekking van golven. De opgewekte golven drijven op hun beurt een stroming langs de kust aan (de golfgedreven stroming of brandingsstroom). Ook veroorzaakt de wind de zogenaamde windgedreven stromingen. Omgekeerd leiden veranderingen in de bodemligging tot veranderingen van de hydraulische omstandigheden die doorwerken in het zandtransport. Ook heeft een verandering van de eigenschappen van het bodemmateriaal een directe invloed op de grootte van het optredende zandtransport. Er is dus sprake van een onderlinge

wisselwerking, waardoor het morfologische systeem een ingewikkeld karakter heeft (zie Figuur 2-2).



Figuur 2-2: Schematisatie van het morfologische systeem (TAW, 1995)

Een kust profiel kan nooit geheel in evenwicht zijn, wel bestaat er een dynamisch evenwicht waarin een kustprofiel zich kan bevinden. Een kustprofiel zal zich voortdurend trachten om te vormen tot een profiel dat behoort bij de momentane hydraulische omstandigheden. Wanneer de vormveranderingen zonder resulterend zandverlies of zandwinst plaatsvinden, heerst er een situatie van zogenaamd dynamisch evenwicht. Een in de tijd onveranderlijk profiel wordt echter nooit bereikt, omdat de hydraulische omstandigheden continu veranderen. Het dynamische evenwicht kan verstoord worden als lokaal een gradiënt in het langstransport of dwarstransport aanwezig is.

Een soort van dynamisch evenwicht is de seizoensvariatie van het dwarsprofiel. In het winterseizoen (hoge waterstanden en hoge golven) overheerst het zeewaarts gerichte transport en treden de hoger gelegen delen van het kustprofiel op als sedimentbron. Dit resulteert in verflauwing van het kustprofiel. In het zomerseizoen (lagere golven) overheerst het landwaarts gerichte transport. Het zand dat tijdens het winterseizoen zeewaarts is getransporteerd, zal geheel of gedeeltelijk landwaarts worden getransporteerd door de werking van golven en wind.

2.4 Tijd -en ruimteschalen

tijd -en ruimteschaal	oorzaken/factoren	
	natuurlijk	menselijk
erg lange termijn eeuwen tot millennia 100 km en meer	<ul style="list-style-type: none"> • sediment beschikbaarheid • relatieve zeespiegel veranderingen • differentiële bodem veranderingen • geologische zettingen • lange termijn klimaat veranderingen • paleomorfologie 	<ul style="list-style-type: none"> • menselijke aangedreven klimaat veranderingen • grote rivierregulaties • aanleg grote kunstwerken langs de kust • grote reclamaties en afsluitingen • structureel kust (dis-) management

lange termijn decennia tot eeuwen 10-100 km	<ul style="list-style-type: none"> • relatieve zeespiegel veranderingen • regionale klimaat veranderingen • cycli van getijden bekkens • zandgolven • extreme gebeurtenissen 	<ul style="list-style-type: none"> • rivier regulaties • kunstwerken langs de kust • reclamaties en afsluitingen • kust (dis-) management • verwijdering van natuurlijke bronnen
middellange termijn jaren tot decennia 1-5 km	<ul style="list-style-type: none"> • golfklimaat variaties • zandbanken cycli in brekerzone • extreme gebeurtenissen 	<ul style="list-style-type: none"> • constructies in breker zone • kustsuppleties
korte termijn uren tot jaren 10 m -1 km	<ul style="list-style-type: none"> • golven, getij en stormvloed • seizoen klimaat variaties 	<ul style="list-style-type: none"> • constructies in breker zone • kustsuppleties

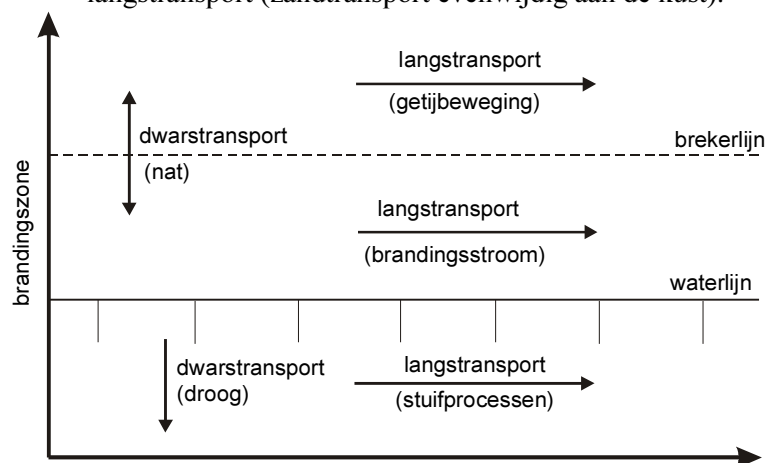
Tabel 2-2: Natuurlijke en menselijke oorzaken en factoren van kust -en kustlijn variaties (Stive et al., 2002)

Bij de beschouwing van de variabiliteit van het kustgedrag komen zeer veel fluctuaties voor. Belangrijk is dan ook om te bepalen welke tijd -en ruimteschalen van belang zijn bij onderzoek naar het kustgedrag. In Tabel 2-2 staan per tijd -en ruimteschaal enkele mogelijke oorzaken en factoren van variaties van het kustgedrag. De schaalverdeling in vier schalen is gebaseerd op het idee dat morfologische processen langs de kust kunnen worden verdeeld in "natuurlijk voorkomende" niveaus van verschillende tijd -en ruimteschalen, waarbij elk niveau wisselwerking heeft met de hoger en lager gelegen niveaus op een systematische wijze (Capobianco et al., 1998). Ieder niveau in de hiërarchie kan een niveau van grotere schaal als randvoorwaarden beschouwen en een kleiner schaal niveau als representatie van het interne gedrag. De tijd -en ruimteschalen die in deze studie vooral van belang zijn die van de middellange en lange termijn.

2.5 Sedimenttransport

Bij de beschouwing van de sediment transporten in de kustzone kan onderscheid gemaakt worden tussen twee type transporten (zie Figuur 2-3):

- dwarstransport (zandtransport loodrecht op de kust);
- langstransport (zandtransport evenwijdig aan de kust).



Figuur 2-3: Sedimenttransport in langs -en dwarsrichting

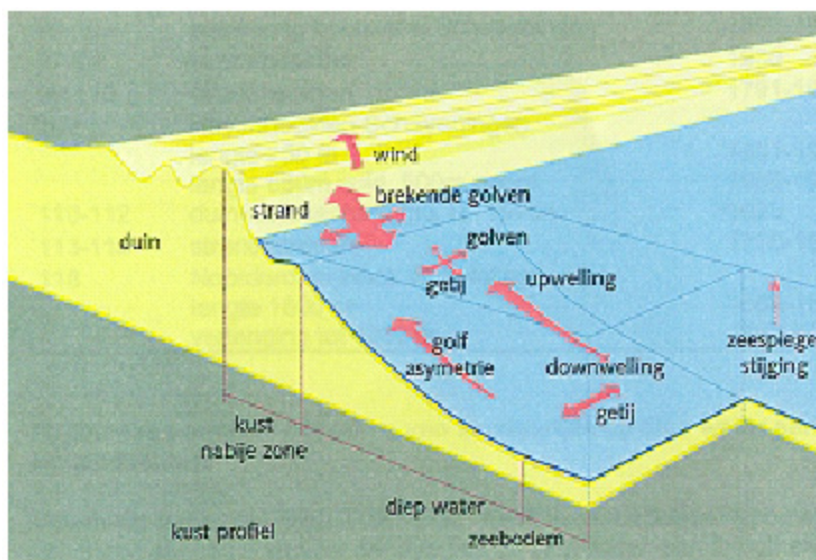
Het dwarstransport is vervolgens onder te verdelen in twee categorieën:

- het 'droge' dwarstransport: op het strand en in de duinen treden zandtransporten op als gevolg van de wind, met voornamelijk rollende en springende zandkorrels. Voor de zogenaamde stuifprocessen op strand en duin is vooral het lokale windveld van belang (Arens, 1994, van der Wal, 1999);
- het 'natte' dwarstransport: in de brandingszone treedt een intensief dwarstransport op onder invloed van brekende golven. Het vanaf dieper water of vanuit een aangrenzend

kustvak aangevoerde sediment kan op het strand worden afgezet en vervolgens door de werking van de wind verder landinwaarts worden getransporteerd.

Dwarstransporten in de natte kustzone kunnen optreden ten gevolge van:

- golfasymmetrie en andere golfeffecten;
- muistromen (kleinschalig);
- windgedreven circulaties, zoals downwelling en opwelling;
- getijgedreven neren (bijvoorbeeld bij havendammen);
- dichtheidsgedreven transporten, vooral bij de uitmonding van rivieren;
- variaties in korreldiameters;
- stormvloed (kleine tijdschaal, meestal zich zelf herstellend)



Figuur 2-4: Overzicht van hydrodynamische processen in de kustzone (Stive et al., 1990)

De langstransporten in het kustgebied worden veroorzaakt door de werking van:

- scheef invallende golven;
- wind -en getijgedreven stromingen.

Een aantal van de processen die de transporten in de kustzone veroorzaken zijn weergegeven in Figuur 2-4.

Indien er een groot langtransport of dwarstransport optreedt in een bepaalde kustsectie wil dit nog niet zeggen dat er erosie of aanzanding in deze sectie plaatsvindt. De zandbalans van een bepaalde sectie wordt dan ook niet bepaald door de grote van de transporten in een bepaalde sectie, maar door de gradiënten (de hoeveelheid sediment die de sectie in gaat min de hoeveel die eruit gaat) van deze transporten. Gradiënten in het sedimenttransport treden op als gevolg van morfologische en hydraulische variaties in de dwars- of langsrichting. Gradiënten in dwarsrichting leiden tot een steiler of flauwer wordend profiel en gradiënten in langsrichting veroorzaken erosie of aanzanding. Het zandverlies of zandwinst dat in een bepaald tijdstek heeft plaatsgevonden, kan door het opstellen van een zandbalans worden gekwantificeerd.

Gradiënten in het langtransport (toenemend transport) die erosie veroorzaken kunnen voorkomen als gevolg van:

- langs de kust geleidelijk sterkere wind -en getijgedreven stromingen;
- langs de kust geleidelijk toenemende golfhoogten; Hierdoor neemt zowel de mate van opwoeling, als de sterkte van de golfgedreven stroming toe;
- hoekverdraaiingen van de kustlijn of de hoek van golfinval in langsrichting; In beide gevallen verandert de hoek die de invallende golven met de kust maken. Indien deze

invalshoek dichterbij 45 graden komt, neemt ook de sterkte van de golfgedreven stroming toe;

- veranderingen in de eigenschappen van het bodemmateriaal (korreldiameter, aanwezigheid van resistente lagen).

De aanwezigheid van variaties komen ook in combinatie voor. Daarom is het vaak niet duidelijk welke variaties tot de gradiënt in het langtransport hebben geleid. Vooral de ruimtelijke variaties in het golfklimaat en in de oriëntatie van de kustlijn kunnen grote effecten op het langtransport hebben (TAW, 1995).

2.6 Kustmetingen

Metingen van kustprofielen en de kustlijnligging zijn van essentieel belang bij onderzoek van het gedrag van de kust. Een lange reeks van metingen is beschikbaar van de Hollandse kust, wat uniek is over de wereld.

Langs de gehele Hollandse kust zijn strandpalen aanwezig, met een tussenafstand van in het algemeen 250 meter. Deze palenrijen worden als referentielijn wordt gebruikt, de zogenaamde "Rijks Strand Palen lijn" (RSP-lijn), die de afstand tot Den Helder weergeeft.

De ondiepe kustzone (tussen de zeereep en NAP -8m) is volledig beschreven door de jaarlijkse JARKUS-waarnemingen, welke vanaf 1965 met tussenafstanden van 250 m langs heel de kust zijn uitgevoerd. In de diepere zone (van NAP -8 tot -20m) beperken de metingen zich tot doorlodingen; waarnemingen welke vanaf 1980, elke 5 jaar, met tussenafstanden van 1000m langs de kust zijn uitgevoerd. Deze metingen lopen globaal tot een diepte van tussen NAP -8m en -12m.

In de periodes daar voorafgaand zijn er ook al allerlei metingen verricht, al waren deze minder uitgebreid. Sinds 1843 worden jaarlijks de posities van de GLW-lijn, de GHW-lijn en de positie van de duinvoet gemeten in raaien met een onderlinge afstand van 1000m. De referentie van deze metingen is de RSP-lijn. In sommige kustvakken (zoals Delfland) wordt sinds eind vorige eeuw systematisch gehele dwarsprofielen opgemeten. Verder zijn er nog de zogenaamde vaklodingen; dieptemetingen in het gebied zeewaarts van de jaarlijkse kustlodingen, reikend tot in de nabijheid van de NAP-20m lijn. Dit gebied is ingedeeld in vakken met variërende raairichting. De opnamefrequentie varieert en wordt afhankelijk gesteld van de beweeglijkheid van de bodem. De minimaal aangehouden frequentie is eenmaal per 5 jaar.

2.7 Kustbeleid

Voor de voorspelling van toekomstige trends is het van belang om ook het kustbeleid goed te bestuderen. Het kustbeleid geeft namelijk inzicht in de mate van menselijk ingrijpen in de kustzone in de nabije toekomst.

De onderstaande tekst komt uit "Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel" (Mulder, 2000). De meest relevante elementen voor deze studie zijn eruit gefilterd.

Doelstellingen van het dynamisch handhaven van de kust (Nota Kustverdediging na 1990):

'De kustlijn blijft gehandhaafd op de plaats waar deze in 1990 ligt.' In 1990 is als hulpmiddel de basiskustlijn (BKL) vastgesteld.

In de Nota Kustbalans 1995 is daaraan toegevoegd:

'Om dynamisch handhaven op termijn van enkele decennia te kunnen blijven volhouden, moeten ook de zandverliezen op dieper water worden gecompenseerd'.

Gewenste maatregelen om het beleid vorm te geven:

'Meewerken met natuurlijke processen: zandsuppleties in plaats van dammen en bastionkusten. Hoe natuurlijker het systeem, hoe groter het zelfherstellende vermogen. Een veerkrachtige kust is de beste garantie voor duurzame veiligheid'.

Kustverdediging:

'Het kustverdedigingbeleid is gericht op het dynamisch handhaven van de kustlijn. Dat betekent dat de natuurlijke processen zo min mogelijk worden belemmerd, maar dat ingegrepen wordt als er land blijvend verloren dreigt te gaan. Dan wordt een suppletie uitgevoerd. Vanaf het jaar 2000 worden ook de zandverliezen op de onderwateroever met suppleties uitgevoerd'.

Kustlijnhandhaving: kleinschalige benadering op het niveau van kustsecties.

Maatgevend voor de totale omvang van de suppleties is niet het totale saldo van de zandbalans in de ondiepe kustzone, maar de totale verliespost binnen de ondiepe zone. Alle zandverliezen in de ondiepe zone van de kustsecties dienen te worden aangevuld.

Veerkrachthandhaving: grootschalige benadering op het niveau van kustsystemen.

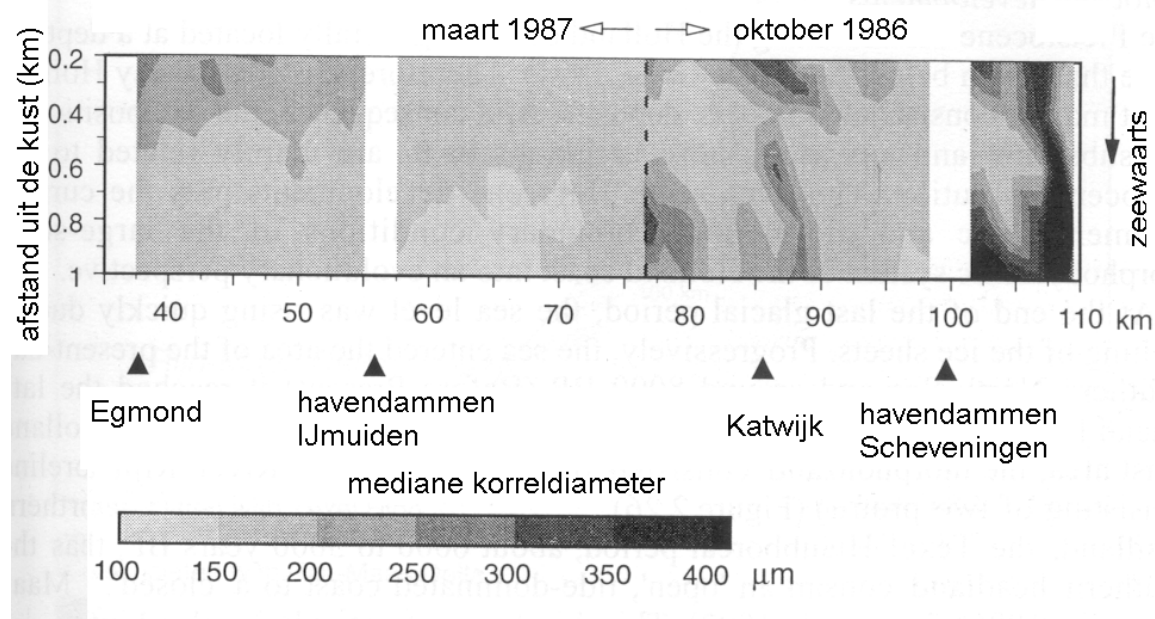
Een negatief saldo van de zandbalans in het kuststelsel over een periode van enkele decennia, dient te worden aangevuld. Hoeveel zand daarmee is gemoeid hangt af van de schaal die in beschouwing wordt genomen: de ruimtelijke begrenzing van het kuststelsel en de periode.

3 Gebiedsbeschrijving

3.1 Zandgegevens

Het meeste zand langs de Hollandse kust valt binnen de korreldiameter klasse van fijn (125-250 μm) tot medium (250-500 μm) zand (Figuur 3-1). Tussen Den Helder en Bergen aan Zee (km 30) valt de gemiddelde korreldiameter D_{50} in de klasse van 250-500 μm (Stolk, 1989). Bovendien zijn in deze sectie een aantal klei en veenlagen aanwezig met een dikte die varieert tussen de 0.2 en 2 meter (Wijnberg, 1995). Vanaf Bergen aan Zee (km 30) tot Hoek van Holland is het zand iets fijner en valt in de klasse 125-250 μm . Bij IJmuiden is ook een verandering van het patroon van de korreldiameters waar te nemen. Ten zuiden van IJmuiden is het zand namelijk fijner dan ten noorden van IJmuiden. Deze scheiding wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de 2 km lange havendammen. Tussen km 100 en 110 is zeewaarts ook een grote verandering in de mediane korreldiameter waar te nemen. Het sediment wordt daar zeewaarts steeds grover, wat het gevolg kan zijn van oudere stortingen of recentere strand suppleties (van Alphen, 1987).

Op het gemiddelde hoog water niveau varieert de gemiddelde korreldiameter langs de kust tussen de 195 en 380 μm , met een gemiddelde van 262 μm . Op het gemiddelde laag water niveau varieert deze tussen de 185 en 420 μm , met een gemiddelde van 286 μm (Van Bemmelen, 1988; Short, 1991).



Figuur 3-1: Korreldiameter verdeling langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995)

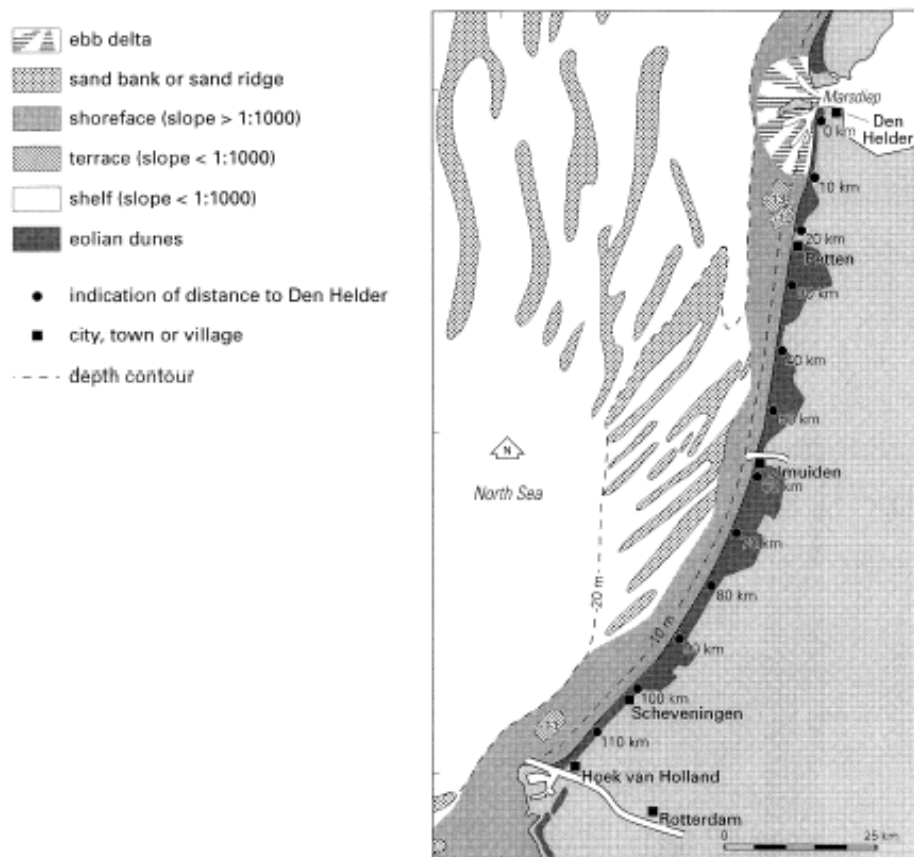
3.2 Morfologie

De onderstaande tekst is grotendeels afkomstig uit "Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades", Wijnberg, 1995.

Onderwateroever:

Er zijn een aantal shoreface connected ridges aanwezig voor de Hollandse kust die de zeebodem en de vooroever met elkaar verbinden (zie Figuur 3-2). Deze "banken" bevinden zich over het algemeen op ongeveer 18 m diepte en zijn 2 m hoog en hebben een cross-bank breedte van 5 km. De banken migreren langzaam in de richting van de vloedstroom (noordwaarts) met ongeveer een snelheid van 1m/jaar (Van de Meene, 1994). De overgang tussen de onderwateroever en de zeebodem varieert langs de kust tussen de 15 en 20 m waterdiepte (Stolk, 1989). De gemiddelde helling van de vooroever varieert van 1:150 - 1:450

(zie Figuur 3-3). Bij IJmuiden verloopt het profiel flauwer, doordat de zandbanken vanaf de zeebodem zijn verbonden met de onderwateroever. Bij km 15 en km 115 zijn terrasachtige onderbrekingen van de holle vorm van de onderwateroever aanwezig (Van Alphen en Damoiseaux, 1988). Bij km 15 zijn er 2 natuurlijke terrassen op respectievelijk 10 en 13 m diepte (Figuur 3-2). De ondiepste van de twee is de Pettemer Polder. Het zuidelijke terras ligt loodrecht op de kust. Bij km 115 is een kunstmatig terras aanwezig (Loswal Noord), dat ligt op 11m diepte. Dit terras is ontstaan door het herhaaldelijk dumpen van baggerspecie.



Figuur 3-2: Geomorfologie van de Hollandse kust (Wijnberg, 1995)

Bodemhelling:

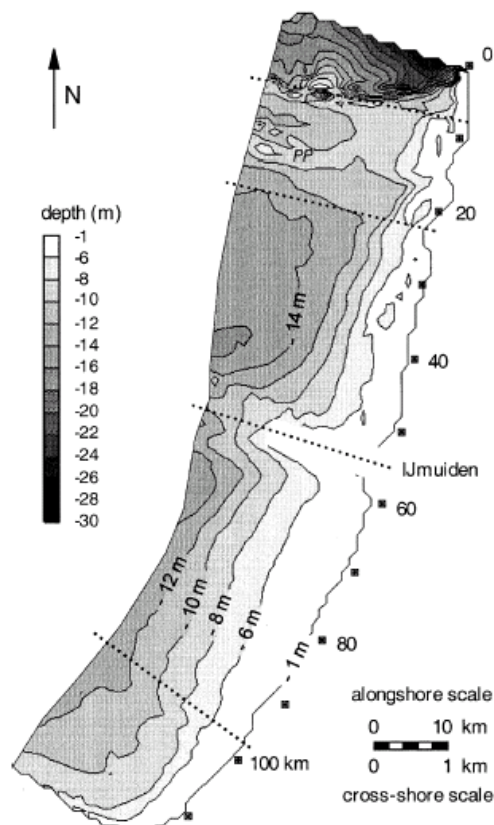
De gemiddelde helling (tussen de +1m lijn tot ongeveer 750 m zeewaarts) van de brekerzone is tussen de 1:150 tot 1:60 (Knoester, 1990). Schattingen van de gemiddelde helling van de kustlijn tot 8m diepte geven een soort gelijk patroon langs de kust (Short, 1991). Door de Hondsbossche zeewering op km 25 die 75-150 m verder de zee in ligt dan de aanliggende stranden, verloopt het profiel daar steiler.

Zandbanken:

Op de meeste plaatsen langs de Hollandse kust zijn zandbanken aanwezig, variërend in aantal van tussen de 1 en 4. Er kunnen twee hoofd meervoudige banken systemen onderscheiden worden langs de Hollandse kust: de Noord-Hollandse en de Zuid-Hollandse, die gescheiden worden door de havendammen van IJmuiden. De cross-shore breedte van de breker banken is ten noorden van IJmuiden 300-400m en ten zuiden 200-240m (Short, 1991). De zandbanken liggen onder een kleine hoek tegenover de kustlijn. De karakteristieke tijdschaal van het doorlopen van een cyclus van het banken systeem op de Noord-Hollandse kust is ongeveer 15 jaar en op de Zuid-Hollandse 4 jaar. Ten zuiden van IJmuiden, tussen km 60 en 96, bestaat de buitenste bank uit één continu zandlichaam, waar dit ten noorden van IJmuiden, tussen km 27 en 48 niet het geval is (Knoester, 1990). Ten noorden van km 28 en ten zuiden van km 98 zijn

geen zandbanken aanwezig, wat kan komen door de daar aanwezige strandhoofden en palenrijen.

Volgens Wijnberg (1997) vinden veranderingen van de buitenste banktopografie meestal plaats tijdens de stormachtige periode in de winter (september - maart). Zolang de buitenste bank op zijn positie blijft, dan kan de binnen liggende bank niet zeewaarts verplaatsen. De voortdurende degeneratie van de buitenste bank kan verklaard worden door de balans tussen condities die de bank degeneratie veroorzaken (asymmetrische golven op de buitenste bank; milde storm condities) en condities die goed zijn voor het voortbestaan van de buitenste banken (brekende golven op de buitenste banken; zware storm condities).



Figuur 3-3: Verloop van dieptelijnen langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995)

Zandgolven:

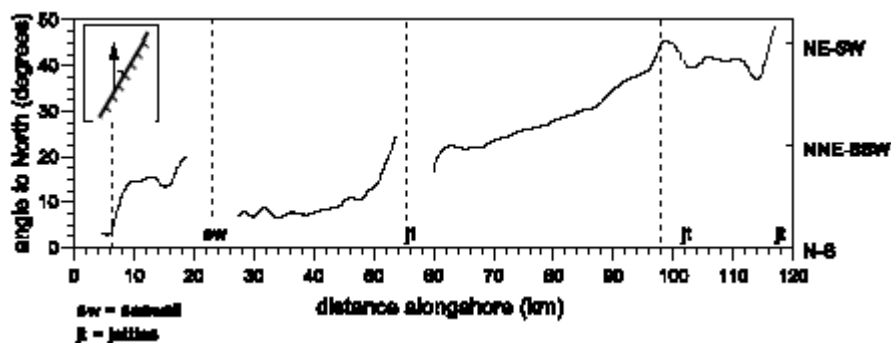
Naast de verplaatsing van de zandbanken in dwarsrichting zijn er ook (horizontale) zandgolven langs de Hollandse kust aanwezig die zich juist verplaatsen in langsrichting. Zandgolven zijn massa's zand met een lengte van vaak enkele kilometers die zich langs de kust verplaatsen, waarbij ze hun identiteit (vorm) behouden voor een periode van maanden tot decennia. Zandgolven hebben een merkbaar effect op de kustlijnligging. Onder invloed van zandgolven zandt op sommige locaties de kust tijdelijk aan terwijl tegelijkertijd op ander locaties de kust tijdelijk erodeert (Boers, 2002). De migratie snelheid van zandgolven is over het algemeen ongeveer 100-300 m/jaar.

Voor de kustsectie Den Helder - Petten is een zandgolf aanwezig met een golflengte van 7 km en een periode van minimaal 75 jaar (Boers, 2002). Deze zandgolf stemt echter niet overeen met fluctuaties in de JARKUS -metingen in het noordelijke deel van dit kustvak, die een lengte hebben van ongeveer 2 km. In de sectie Camperduin (km 26) - IJmuiden is een zandgolf aanwezig die zich verplaatst in zuidwaartse richting. De golflengte bedraagt ongeveer 2 km en over de periode bestaat weinig eenduidigheid. De zandgolf heeft vermoedelijk geen constante voortplantingssnelheid in de tijd. Zandgolven in het kustvak Camperduin - IJmuiden lijken sterk beïnvloed te worden door ritmische patronen in de

buitenste brekerbank, zoals beschreven door Wijnberg (1995). In Rijnland (km 56-71) blijken zandgolven afwezig te zijn. In de sectie IJmuiden - Hoek van Holland wordt over het algemeen beschouwd dat er geen zandgolven aanwezig zijn en anders weinig invloed hebben op de kustlijnligging.

Oriëntatie kustlijn:

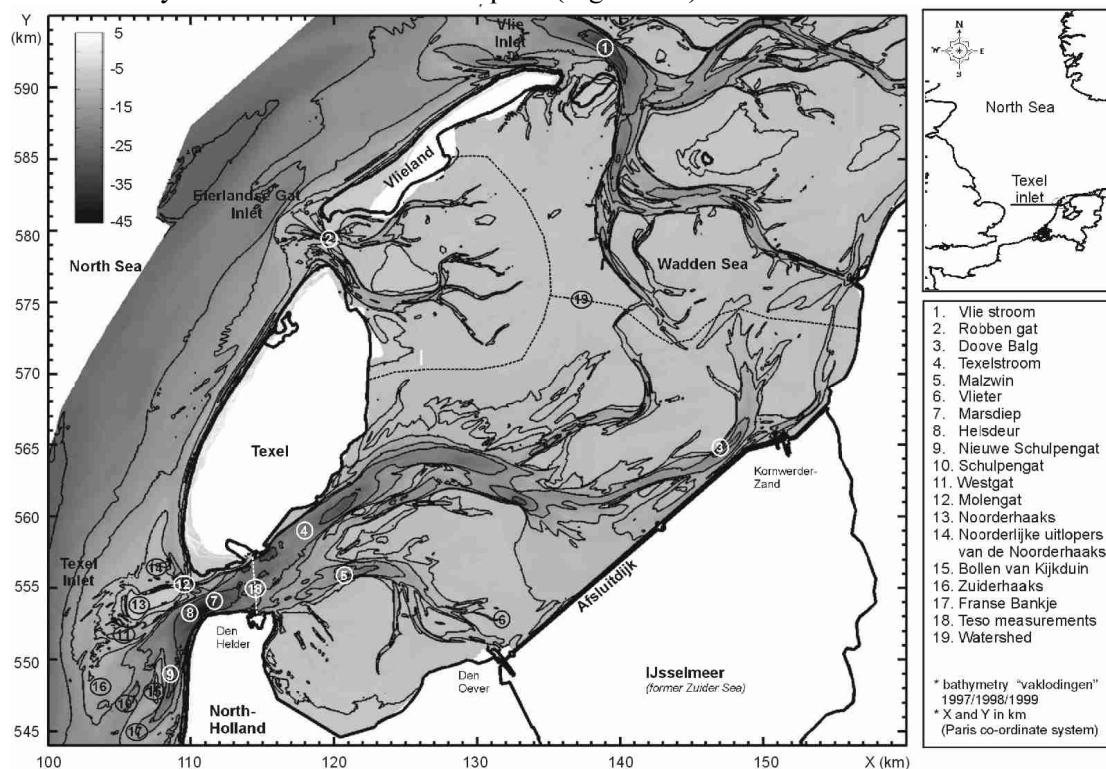
De oriëntatie van de kustlijn heeft veel invloed op het golfgedreven langtransport langs de kust. Volgens Stive en Eysink (1989) ligt het nulpunt van het netto langtransport als gevolg van het huidige golfklimaat bij een kustlijnoriëntatie van 18-20° t.o.v. het noorden, zodanig dat een kleinere hoek in zuidwaarts transport resulteert en een grotere hoek in noordwaarts transport. De kustlijn van de Hollandse kust heeft een holle vorm. Op km 25 heeft de kustlijn een oriëntatie van 8° (t.o.v. het Noorden) en wordt geleidelijk groter richting het zuiden tot 42°. Deze geleidelijke verandering wordt lokaal verstoort door havendammen (km 56, 102 en 118.5), zoals in Figuur 3-4 is te zien.



Figuur 3-4: Oriëntatie van de kustlijn t.o.v. het noorden (Wijnberg, 1995)

Buitendelta:

De Hollandse kust wordt in het noorden begrensd door een buitendelta, die in belangrijke mate de bathymetrie tussen km 0 en 9 bepaalt (Figuur 3-5).



Figuur 3-5: Bathymetrie van het zeegat van Texel (Elias, et al., '03)

De buitendelta loopt tot ongeveer 10 km zeewaarts en bestaat onder andere uit een groot ondiep gedeelte, het Noorderhaaks die zich voor de inlaat het Marsdiep bevindt. Het Marsdiep is ongeveer 2.5 km breed en heeft een gemiddelde diepte van ongeveer 53 m. Het getijprisma door het Marsdiep is 10^9 m^3 . Het Marsdiep kan worden geclassificeerd als een mixed- energie getij gedomineerde inlaat volgens de classificatie van Hayes (1979). Het zeegat van Texel vormt de scheiding tussen de Waddenkust en de Hollandse kust. De hoofd ebgeul, het Nieuwe Schulpengat, ligt vlak tegen de Noord-Hollandse kust aan en heeft daardoor een grote invloed op deze kustsectie.

Vorige studies die zich bezig hielden met het zandbudget langs de Hollandse kust (Stive en Eysink, 1989; Wijnberg, 1995; van Rijn, 1995) laten zien dat de interactie van het getijde bekken met het getij en het golf beschuttende effect door de buitendelta van groot belang zijn voor het zandtransport van de aanliggende bovenstroomse kust. Deze invloed wordt als één van de belangrijkste factoren beschouwd van het zandverlies van de Noord-Hollandse kust. Over de reikwijdte en de omvang van het effect bestaat echter weinig duidelijkheid.

In de studie van Stive en Eysink (1989) wordt de erosie van de noordelijke gedeeltes van de Noord-Hollandse kust verklaard door de holle vorm van de kust, die een gradiënt in het golfgedreven langstransport veroorzaken. Bovendien ontstaat er een extra gradiënt in het langstransport door de zandimporterende capaciteit van de Waddenzee, welk effect reikt tot 35 km zuidwaarts vanaf het zeegat van Texel volgens Stive en Eysink. Uit observaties van het bankengedrag door Wijnberg (1995) lijkt het effect van de buitendelta te reiken tot 25 km updrift van het zeegat van Texel. Een recente analyse van de buitendelta morfologie (Walburg, 2001) laat zien dat het volume van de buitendelta de laatste 30 jaar vrijwel stabiel is gebleven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het zand dat in de Waddenzee sedimenteerd van de aanliggende kusten moet komen, waarvan waarschijnlijk een deel van de Hollandse kust. Dit is goed te zien aan de kustlijnachteruitgang van de kustsecties in de omgeving van het Marsdiep.

3.3 Sedimentatie/ erosie patronen

3.3.1 Ondiepe kustzone (NAP +3/-8m)

Het is niet eenvoudig om trends van de kustlijnontwikkeling te bepalen. In de meeste meetseries van sediment volumes zijn de jaar-tot-jaar fluctuaties vaak een orde groter dan de jaar-tot-jaar veranderingen door de lineaire trend (Van Vessem en Stolk, 1990). Daarom moet de statische betekenis van de lineaire trends niet te letterlijk worden genomen. Bovendien verschillen de verscheidene studies veel in keuze van offshore en cross-shore grenzen die gebruikt worden om de controle volumes te bepalen, waaruit de lineaire trend kan worden gehaald. Ook de definitie van het controle volume verschilt veel in de verschillende studies. Daarom kunnen de volgende trends van kustlijnontwikkeling en erosie -en aanzandings volumes alleen een orde van grote aangegeven en moet in gedachten gehouden worden dat de onzekerheid vrij groot is.

De meeste studies die het gedrag van de kustlijn beschrijven, laten ten noorden van Egmond en ten zuiden van Scheveningen kustlijn achteruitgang zien en in de tussenliggende sectie propagatie (Wijnberg, 1995). Volgens van Vessem (1990) is de gemiddelde waarde van kustlijn verplaatsing over de laatste 140 jaar (1850-1990) ten zuiden van Scheveningen 0.35 m/jaar terugtrekking, met uitzondering van het gebied direct ten noorden van de havendammen van Hoek van Holland. Vanaf Scheveningen naar Egmond is er een propagatie van 0.25 m/jaar, die plaatselijk een stuk groter is bij de havendammen bij IJmuiden. Ten noorden van Egmond is de gemiddelde achteruitgang van de kust 0.9 m/jaar.

De fysische verklaring van dit grootschalige sedimentatie-erosie patroon wordt toegeschreven aan gradiënten in het langstransport (Stive en Eysink, 1989). De holle vorm van de Hollandse

kust induceert gradiënten in het golfgedreven langtransport. Bovendien wordt er verondersteld dat het zeegat Marsdiep een extra gradiënt in het langtransport veroorzaakt. Deze gradiënt zou het gevolg zijn van de zandhoger van de Waddenzee en ondiep water effecten voor golven uit de richting noord en noordwest.

Een andere verklaring voor verschillen in kustlijn migratie zijn verschillen in grote van tectonische zakkings (Wiersma, 1991). Volgens Beets (1994) vergroot de aanwezigheid van kleilagen op lange termijn de grote van erosie in deze gebieden. Op korte termijn zijn deze kleilagen erosie resistent, maar op lange termijn geeft dit onomkeerbare verliezen van sediment, omdat fijn sediment makkelijk uit dit gebied getransporteerd wordt.

Bouwmeester et al. (1994) hebben een lineaire trend analyse uitgevoerd van de jaarlijkse kustmetingen (JARKUS) over de periode 1963-1992, waarbij gecorrigeerd is voor suppleties. Hieruit volgt een voorspelling van kustlijnonwikkeling op korte termijn, maar ook de trend van de kustlijnonwikkeling over de meetperiode. Elk kustprofiel is bij deze studie verdeeld in drie zones:

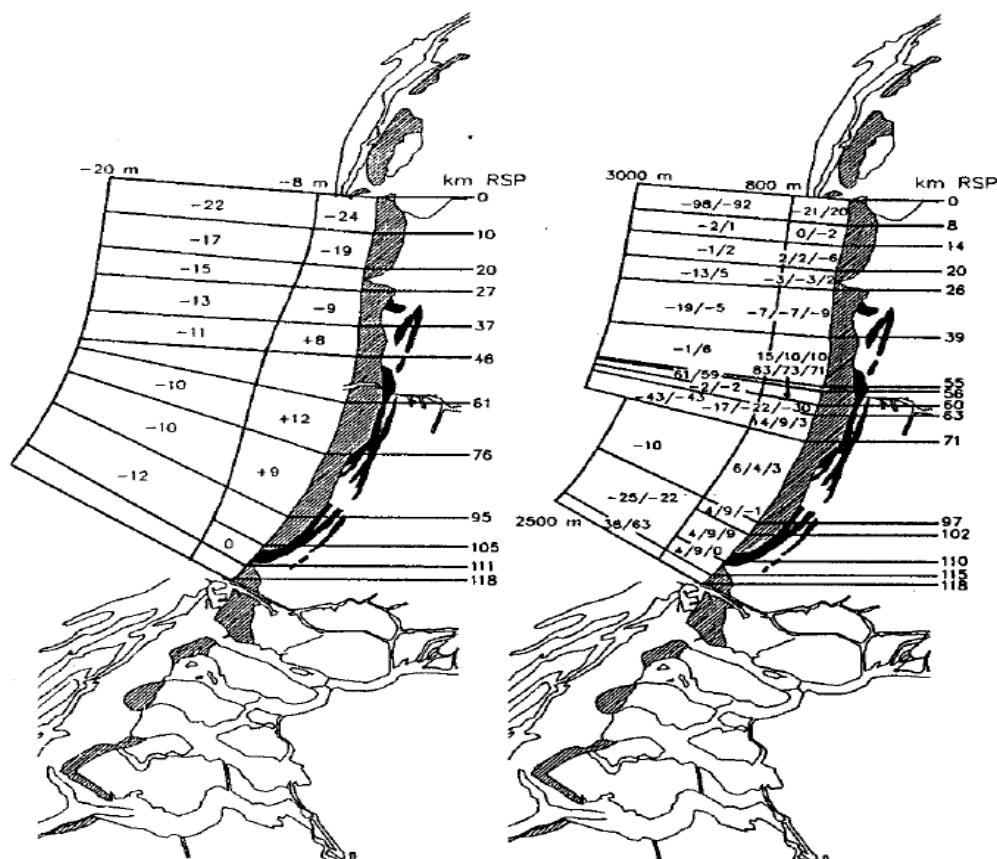
- eerste duinregel (zone boven NAP +3m);
- strand (zone tussen NAP-1m en NAP +3m);
- onderwateroever (zone tussen NAP -6m en NAP -1m).

Sectie	RSP-lijn	trend
Onderwateroever (zone tussen NAP -6m en NAP -1m):		
Den Helder- de Kaap	0.90-7.89	significante erosieve trend, laatste 10 jaar versterkt
de Kaap- Pettemer zeewering	7.89-17.00	overwegend geringe aanzanding
Pettemer- en Hondsb. zeewering	20.27-26.15	erosieve trend
Hondsb. zeewering- Castricum	27.00-47.00	fluctuerende kustlijn (brandingsruggen)
Castricum- even voor IJmuiden	47.00-49.25	loefzijde erosie
direct ten noorden van IJmuiden	49.25-50.25	aanzienlijke aanzanding
direct ten zuiden van IJmuiden	56.25-59.50	aanzienlijke aanzanding
Bloemendaal-Zandvoort	60.50-68.00	significante erosie
Zandvoort-Noordwijk	68.00-92.00	van positieve naar negatieve trend
Duinoord-Wassenaar-zuid	92.00-97.00	significante erosie
Scheveningen-km 113	102-113	statisch maar niet significante aanzanding
	113-117	significante aanzanding
direct ten noorden van HvH	117-118	erosie
Strand (zone tussen NAP-1m en NAP +3m):		
Den Helder-Egmond aan zee	0-39.00	vrijwel overal achteruit, behalve km 9
Egmond-Castricum	39.00-47.50	afwisselend erosie en sedimentatie
Castricum- even voor IJmuiden	47.50-49.25	erosie
direct ten noorden van IJmuiden	49.25-50.25	aanzienlijke aanzanding
Rijnland	56.25-101.4	gelijke trend met onderwateroever, maar wel significant
Delfland	102-117	significante aanzanding
direct ten noorden van HvH	117-118	erosie
Duinen (zone boven NAP +3m):		
Den Helder-Castricum	0-47.50	grillig verloop, afwisselend erosie/ sedimentatie
Castricum- even voor IJmuiden	47.50-49.25	erosie
direct ten noorden van IJmuiden	49.25-50.25	sterke aanzanding
Rijnland	56.25-101.4	gelijke trend met onderwateroever en strand, overheersende aanzanding slaat echter pas bij km 94 om in erosie
Delfland	102-117.5	significante aanzanding
direct ten noorden van HvH	117.5-118	erosie

Tabel 3-1:Trends van erosie en sedimentatie gecorrigeerd voor suppleties (Bouwmeester et al., 1994)

De trends over deze drie zones voor de gehele Hollandse kust zijn weergegeven in Tabel 3-1. Hieruit blijkt dat de ontwikkeling van de onderwateroever, het strand en het duin aan elkaar gekoppeld zijn, aangezien de trends goed met elkaar overeen stemmen. De Hollandse kust wordt gekenmerkt door korte erosiegebieden, die afgewisseld worden door korte sedimentatie gebieden. Het sterkst komt dit naar voren in het kustvak Noord-Holland (km 0-55). In Rijnland (km 56-102) is dit fluctuerende erosie-sedimentatiepatroon ook nog aanwezig, maar in Delfland (km 102-118) niet. Er wordt verondersteld dat het fluctuerende erosie-sedimentatiepatroon wordt veroorzaakt door migrerende brandingsruggen en het verplaatsen van de bijbehorende mui-zwin-systemen. De invloed van het Marsdiep en de havenhoofden van IJmuiden, Scheveningen en Hoek van Holland komen in de kustlijnontwikkeling en de dynamiek als verstoringen naar boven. De mate waarin deze verstoringen de kustlijnontwikkeling beïnvloeden varieert echter in ruimte en tijd. Zo laat de invloed van het Marsdiep (Nieuwe Schulpengat) in de periode 1983-1992 een versnelling in erosie zien ten opzichte van de periode 1963-1992. Het zuiderhavenhoofd van IJmuiden veroorzaakte in de periode 1983-1992 een grotere, verder zuidwaarts gaande erosie. Ten noorden van de havendammen van Scheveningen laat de trend voor de onderwateroever in de periode 1983-1992 een sterke erosie; dit in tegenstelling tot de trendontwikkeling over in de periode 1963-1992, die sedimentatie aangeeft.

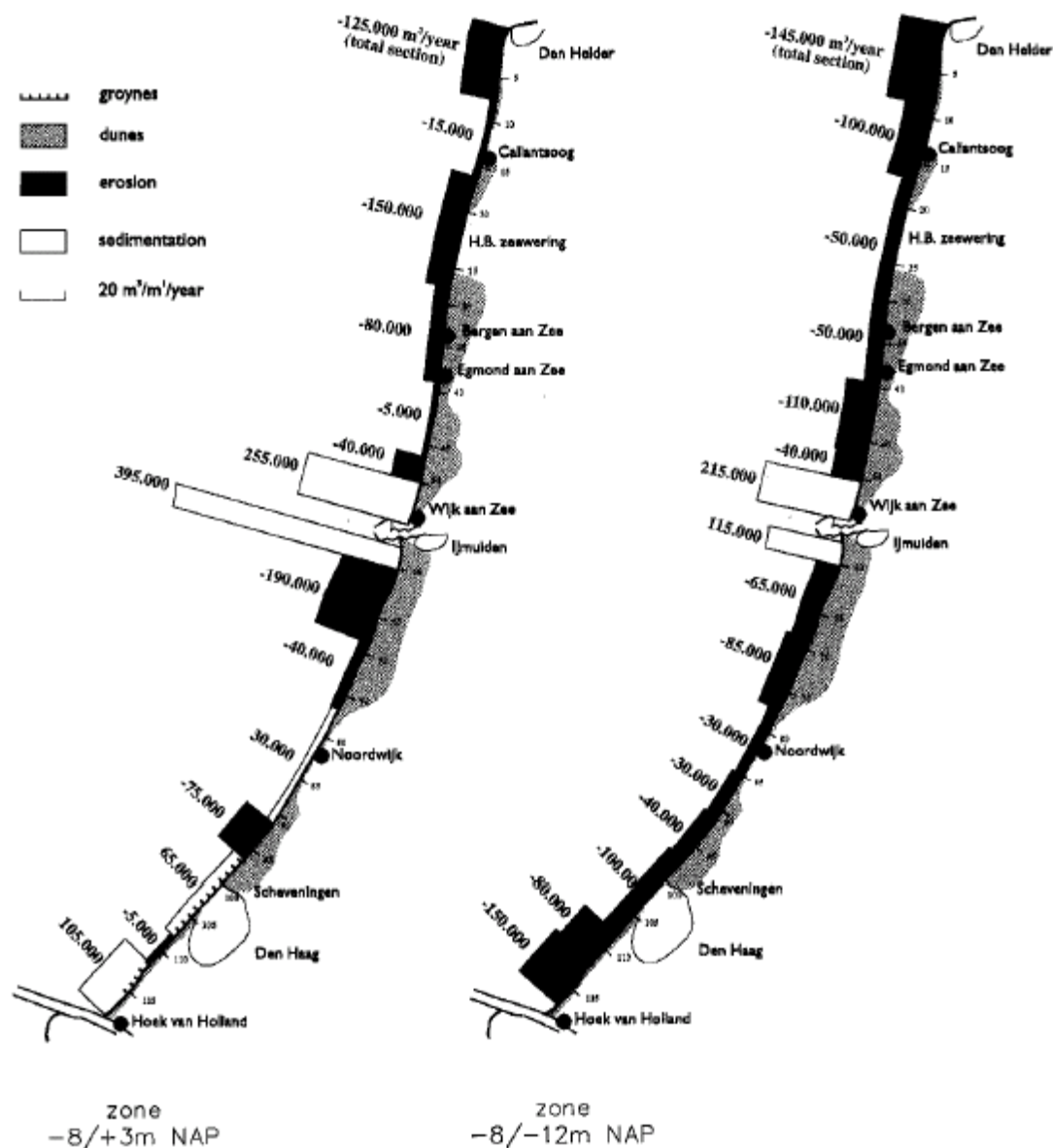
inhoudsveranderingen in $\text{m}^3/\text{m}/\text{jr}$



kombinatie van voorspelling en rekonstruktie met het conceptuele model voor uniforme kustsecties

x/y/z:
 waarnemingen volgens Jarkus- en doorlodingenbestand van 1965-1985;
 x: verschil 1965-1985
 y: lineaire trend '65-'70-'75-'80-'85
 z: geschatte trend '70-'75-'80-'85

Figuur 3-6: Vergelijking van waargenomen en gemodelleerde sedimentbalans van de Hollandse kust in $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ (Stive en Eysink, 1989)



Figuur 3-7: Jaarlijkse gemiddelde sedimentatie en erosie volumes (inclusief suppleties) in de cross-shore zones -8/+3 en -8/-12m NAP langs de Hollandse kust in m³/jaar (van Rijn, 1995)

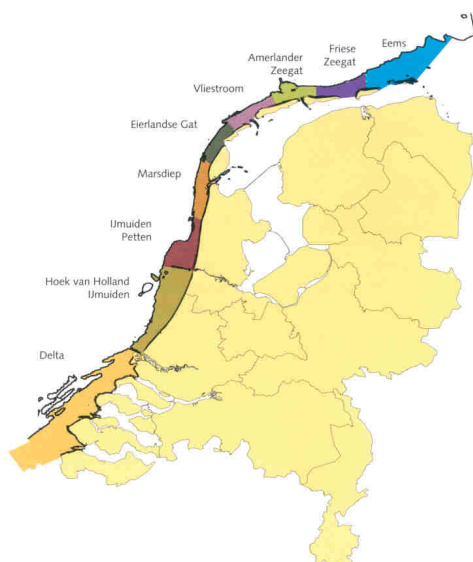
De verscheidene sedimentbudget studies (Stive en Eysink, 1989 en van Rijn, 1995) geven inzicht in de omvang van de erosie -en aanzandingsvolumes. Deze studies maken veelal gebruik van JARKUS -en doorlodingen bestanden. In Figuur 3-6 zijn de trends weergegeven die volgen uit het JARKUS -en doorlodingenbestand over de periode 1965-1985 (Stive en Eysink, 1989).

In Figuur 3-7 zijn de jaarlijks gemiddelde erosie -en sedimentatievolumes weergegeven die volgen uit de JARKUS meetgegevens uit de periode 1964-1992 (Van Rijn, 1995). In de zone NAP -8/+3m vindt vrijwel langs de gehele Hollandse kust erosie plaats. Slechts in de secties direct aanliggend aan de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland is er een netto sedimentatie. Deze sedimentatie is echter zo groot dat er netto sedimentatie resulteert langs de Hollandse kust in de strand -en surfzone van 125.000 m³/jaar.

afstand tot Den Helder (km)	van Rijn	Stam	Groenendijk	PonTos
	NAP +3/-7m	duintop/NAP-8m	duintop/ NAP-5m	NAP +3/-7m
	JARKUS meetperiode			
	1964-1992	1965-1997	1964-1993	1968-1996
11.1-16.3	-45.000	-19.000		
16.3-28	-200.000	-152.000	-120.000	
28-39	-80.000	-140.000	-100.000	
39-47	+5.000	+68.000	+50.000	
47-50	-45.000	-24.000	-20.000	
50-55	+275.000	+167.000	+150.000	+166.000
56.3-60	+415.000	+250.000	+300.000	+345.000
60-68	-200.000	-83.000	-150.000	
68-77	-25.000	+55.000	+50.000	
77-92	+45.000	+60.000	+60.000	
92-97	-75.000	-32.000	-10.000	
97-108	-15.000	+14.000	+10.000	
108-118.5	-35.000	-17.000		

Tabel 3-2: Bewerkte volumeveranderingen (m³/jaar) in de brandingszone van verschillende studies gecorrigeerd voor suppleties (Steezel, 1999)

De volumeveranderingen in de voorgaande figuren zijn echter alle inclusief suppleties. Om de transporten in de kustzone te bepalen zijn de natuurlijke volumeveranderingen echter meer van belang. In Tabel 3-2 staan de volumeveranderingen van een aantal studies gecorrigeerd voor suppleties, waarbij de studies enigszins bewerkt zijn, om ze beter vergelijkbaar te maken. Er blijken toch aanzienlijke verschillen tussen de studies te bestaan. In de sectie km 39-47 is volgens Van Rijn de kust relatief stabiel, terwijl volgens Stam en Groenendijk er sedimentatie is. De grootste verschillen zitten in volumes bij IJmuiden (km 50-60) en in de sectie km 60-68. Bij IJmuiden lijkt Van Rijn de omvang van de sedimentatie volumes enigszins overschat te hebben, net zoals bij km 60-68.



Figuur 3-8: Verdeling van de kust in negen deelsystemen (Mulder, 2000)

De meest recente studie waarin de zandverliezen van het Nederlandse kuststelsel worden beschreven is de studie van Mulder (2000). Hierin worden de natuurlijke trends over de periode 1965-1995 beschreven met behulp van bestaande analyses, samengevat in Kustbalans (1995), Groenendijk (1995A en 1995B), Stam (1999) en Mulder (1999). Het Nederlandse

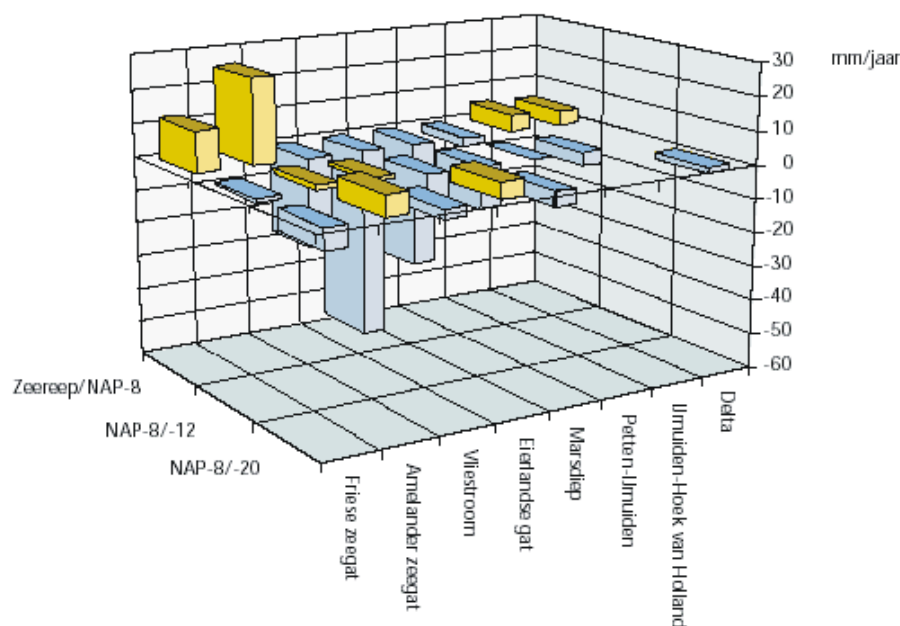
kuststelsysteem is daarbij opgedeeld in negen onafhankelijke deelsystemen (zie Figuur 3-8), waarbij in deze studie de volgende deelsystemen van belang zijn:

- Hoek van Holland - IJmuiden (gescheiden door havenhoofden Hoek van Holland en Maasgeul);
- Petten - IJmuiden: gescheiden door havenhoofden IJmuiden en aan de noordkant (meer diffuus) gescheiden door Pettemer Zeewering;
- Marsdiep: loopt door tot halverwege Texel.

	Marsdiep	Petten - IJmuiden	IJmuiden - Hoek van Holland	Totaal Nederlands kuststelsysteem
ondiepe zone: zeereep tot NAP-8m	-1,04	-0,08	0,25	-1,5
dieper water: NAP -8m/-12m	-0,74	-0,01	-0,43	-1,5
buitendelta's: NAP -8m/-20m	-1,13	-	-	-3,5
Totaal	-2,91	-0,09	-0,18	-6,5

Tabel 3-3: Zandbalans (Mm³/jaar) in verschillende dieptezones over de periode 1965-1995, inclusief de uitgevoerde suppleties (Mulder, 2000)

Hieruit volgend zijn de zandverliezen in de ondiepe zone (zeereep tot NAP -8m) exclusief suppleties in de sectie Marsdiep -1,19 Mm³/jaar, en in de sectie Petten - IJmuiden - 0,32 Mm³/jaar, en tussen Hoek van Holland en IJmuiden -0,14 Mm³/jaar. Het totale verlies van het gehele Nederlands kuststelsysteem in de ondiepe zone is -5,7 Mm³/jaar. Rond de gemiddelde jaarlijkse trend bestaan echter grote fluctuaties. Er moet rekening gehouden worden met onzekerheidsmarges rond het jaargemiddelde van naar schatting $\pm 50\%$. De ondiepe kustzone kent naast de verliesposten echter ook aanzienlijke winstposten, waardoor de resulterende zandbalans in de ondiepe zone van een aantal deelsystemen positief is (bv: IJmuiden - Hoek van Holland). De zandbalans over de periode 1965-1995 voor de verschillende dieptezones van de afzonderlijke deelsystemen is weergegeven in Tabel 3-3 en Figuur 3-9.



Figuur 3-9: Zandbalans in verschillende dieptezones van de afzonderlijke deelsystemen van de gehele Nederlandse kust over de periode 1965-1995, gecorrigeerd voor de uitgevoerde suppleties, uitgedrukt in bodemhoogte verandering in mm/jaar (Mulder, 2000)

De sedimentbalans van de laatste decennia kan enigszins afwijken van de sedimentbalans over een langere tijdschaal (eeuwen) door veranderingen in omgevingscondities (golven, stromingen, zeespiegel) en menselijke ingrepen (grote civiele constructies, suppleties, baggeren). De uitbreiding van de havendammen van IJmuiden lijken een duidelijk effect gehad te hebben op de aanliggende kusten. In de periode 1962-1967 is de zuidelijke havendam uitgebreid met 2800m en de noordelijke dam 2300m. In 1984-1985 is bovendien de toegangseul (IJ-geul) verdiept van NAP-17m tot NAP -20.7m. De eerste 5km direct aanliggend weerszijden van de havendammen vindt er aanzanding plaats. Verder vanaf de havendammen is er enige erosie aan beide zijden van de dammen. Ten westen van de zuidelijke havendam is er bovendien een aanzienlijke ontgrondingskuil ontstaan, met een diepte van ongeveer 25 meter. Volgens de studie VOP IJmuiden (Tanczos, 2002) bereikt het strand ten zuiden van IJmuiden (het Kennemerstrand) in het jaar 2026 zijn evenwichtspositie.

Uit de verschillende studies kan voor de zone van NAP+3/-8m geconcludeerd worden (exclusief suppleties):

- vanaf Den Helder tot Hoek van Holland is er een erosieve trend van ongeveer 150.000-300.000 m³/jaar;
- vanaf Egmond (km 40) tot Den Helder is er een structurele erosieve trend, met plaatselijk korte aanzandingsgebieden, mogelijk veroorzaakt door zandgolven of migrerende mui-zwin systemen;
- in de sectie km 40-47 is de kust relatief stabiel of anderszins een kleine trend van aanzanding;
- in de sectie km 47-50 en km 60-68 is er een structurele erosie trend die mogelijk de laatste decennia afneemt en wordt veroorzaakt door de (uitbreiding) havendammen van IJmuiden;
- aan weerszijden van de havendammen (km 50-60) is er structurele aanzanding, die in omvang de laatste decennia waarschijnlijk afneemt;
- in de sectie km 68-92 is er een kleine trend van aanzanding;
- in de sectie km 92-98 is er structurele erosie die samenhangt met de overgang met en zonder strandhoofden en de havendammen van Scheveningen;
- vanaf km 98 tot km 105 is de kust relatief stabiel en vanaf km 105 tot Den Helder is er structurele erosie door de havendammen van Hoek van Holland;

3.3.2 Diepe kustzone (NAP -8/-12m)

In de studie van Mulder (1999) wordt dieper ingegaan op de zandverliezen op dieper water (ruwweg beneden NAP-8m). Gebaseerd op de doorlodingen uit de periode 1965-1996 kan geconcludeerd worden dat alle kustsecties langs de Noord-Hollandse kust significant zandverlies op dieper water vertonen, terwijl dat voor ongeveer de helft van de Zuid-Hollandse kustsecties niet het geval is. Beschouwd op een grotere ruimteschaal blijken de diep water zandverliezen zowel in het kustvak Noord-Holland als Zuid-Holland significant te zijn. Bij de beschouwing over een langere periode (100 jaar) lijkt de korte termijn trend niet significant af te wijken van de lange termijn trend (zie Tabel 3-4). In de periode 1896-1996 was er erosie van ongeveer 900.000 m³/jaar en in de periode 1966-1996 erosie van 800.000 m³/jaar.

Volgens Van Rijn (1995) eroderen alle secties in de midden shoreface zone (NAP -8m/-12m), met uitzondering van de secties die aan de havendammen van IJmuiden grenzen. Dit resulteert in een erosievolume in de zone NAP -8/-12m van 750.000 m³/jaar. Volgens Stam (1999) was er in de periode 1966-1997 (van km 0.9 -112) erosie van 824.000 m³/jaar, waarvan 399.000 m³/jaar in de sectie km 0.9-55 en 425.000 m³/jaar in de sectie km 56.3-112. In de periode 1898-1997 was er volgens Stam echter tot een erosievolume van 1.259.000 m³/jaar, een aanzienlijk hogere waarde dan in de studie van Mulder.

Bij vergelijking van de volumeveranderingen op kleinere ruimteschaal blijken de studies van Van Rijn en Stam goed overeen te komen (Tabel 3-5). Alleen bij de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland zijn er aanzienlijke verschillen.

Hollandse kust (Den Helder - Hoek van Holland) waargenomen trends in dieper water (-8m tot -12m NAP)				
plaats	termijn	periode	gemiddelde trend (Mm ³ /jaar)	range (%)
netto zandbalans				
Den Helder - Petten	middellang	1966-1996	-0,3	± 100 %
	lang	1896-1996	-0,3	± 50 %
Petten - Hoek van Holland	middellang	1966-1996	-0,5	± 100 %
	lang	1896-1996	-0,6	± 50 %
Totaal	middellang	1966-1996	-0,8	± 100 %
	lang	1896-1996	-0,9	± 50 %
bruto zandverlies				
Den Helder - Petten	middellang	1966-1996	-0,3	± 50 %
	lang	1896-1996	-0,3	± 50 %
Petten - Hoek van Holland	middellang	1966-1996	-0,8	± 50 %
	lang	1896-1996	-0,9	± 50 %
Totaal	middellang	1966-1996	-1,1	± 50 %
	lang	1896-1996	-1,2	± 50 %

Tabel 3-4: Netto en bruto zandbalans op diep water (NAP-8m tot NAP -12m) van de Hollandse kust (Mulder, 1999)

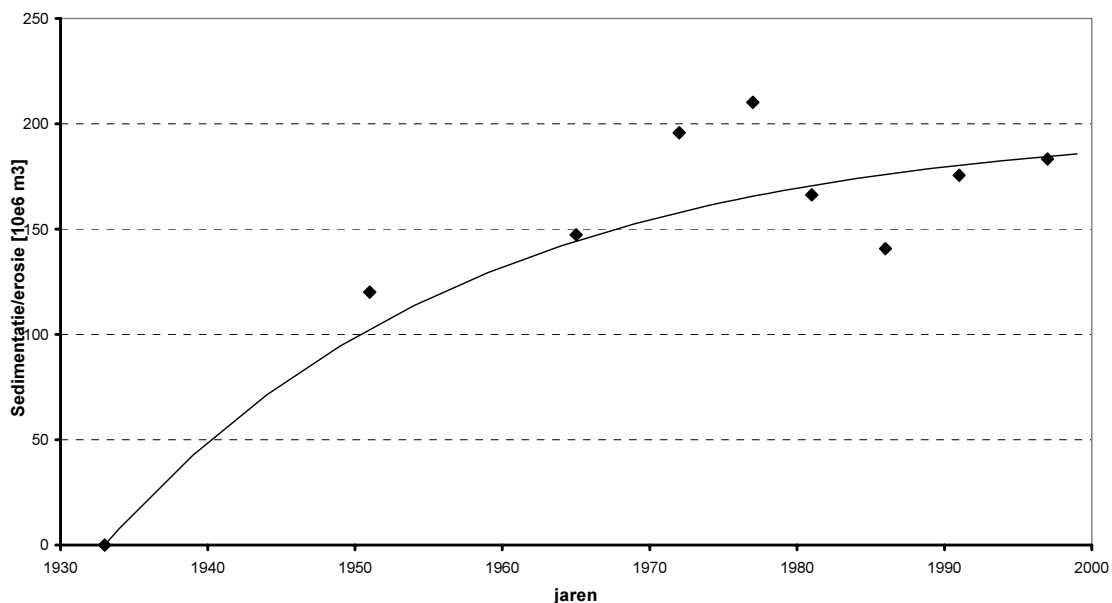
JARKUS/ profiel	van Rijn (1964-1992) NAP -7/-13m	Stam (1965-1997) NAP-8/-12m	Steetzel (1968-1986) NAP -7/-13m
locatie RSP (km)			
11.1-16.3	-75.000	-81.000	
16.3-28	-60.000	-81.000	
28-39	-60.000	-58.000	
39-47	-130.000	-67.000	
47-50	-50.000	-27.000	
50-55	+260.000	+226.000	+209.000
56.3-60	+140.000	+99.000	+171.000
60-68	-80.000	-80.000	
68-77	-100.000	-70.000	
77-92	-70.000	-120.000	
92-97	-50.000	-66.000	
97-108	-120.000	-46.000	
108-118.5	-275.000	-141.000	

Tabel 3-5: Bewerkte volumeveranderingen (m³/jaar) in de zone NAP -7/-8 tot NAP -12/-13m van verschillende studies (Steetzel, 1999)

3.4 Zandvraag van de Waddenzee

Vooral in de eerste jaren na de aanleg van de Afsluitdijk in 1932 is een grote zandvraag van de Waddenzee ontstaan. De analyse van de sediment volumeverandering in de periode 1932-1995 laat echter in de daarop volgende jaren een sterke afname in de tijd zien van de zandvraag van de Waddenzee (Elias et al, 2003). In Figuur 3-10 staat het verloop van het volume van het Waddenzee bassin weergegeven tegen de tijd, na de aanleg van de

Afsluitdijk. Vanaf het jaar 1977 heeft het zandvolume van de Waddenzee mogelijk een evenwichtssituatie bereikt, waar het volume daarna omheen fluctueert. De huidige zandvraag van de Waddenzee is in ieder geval geringer dan in de periode 1930-1970, maar wordt waarschijnlijk nog wel in stand gehouden door de relatieve zeespiegelstijging.



Figuur 3-10: Sediment volumeverandering in het bassin in vergelijking met het bassinvolume in 1933 (Elias et al, 2003)

3.5 Indeling zones langs de kust met verschillend kustgedrag



1. Bovenstrooms gebied
 - a. direct beïnvloed door de buitendelta
ongeveer 9 km
geen onderscheidend banken gedrag
getij gedomineerd
 - b. indirect beïnvloed
tot ongeveer 25 km
enkele bank, stabiel in positie
van golf tot getij gedomineerd
2. Onverstoorde kust
niet beïnvloed
systeem van cyclisch banken gedrag van
meerdere banken
wind en golf gedomineerd

Figuur 3-11: Verdeling van de Noord-Hollandse kust naar beïnvloeding van de buitendelta (Elias, et al., 2002)

In de gehele kustzone bestaan kleine al dan grote fluctuaties in het kustgedrag. Om meer inzicht in de verschillen van het kustgedrag langs de kust te krijgen kan de Hollandse kust in een aantal secties onderverdeeld worden. In het werk van Wijnberg (1995) wordt de kust onderverdeeld in 5 secties in langsrichting die een onderscheidend kustgedrag vertonen. Deze 5 secties met karakterisering zijn:

Regio 1: km 3 - km 8

- kustlijn achteruitgang;
- profiel versteiling;
- kleine, zeewaarts verplaatsende banken.

Wordt gedomineerd door de morfodynamica van het getijdebekken systeem, namelijk de kustwaarts gerichte migratie van het Nieuwe Schulpengat (Sha, 1990). Grens wordt bepaald door verandering in offshore bathymetrie.

Regio 2: km 8 - km 23

- kustlijn achteruitgang en locale propagatie (door grootschalige strandsuppleties);
- verandering van profiel verflauwing in profiel versteiling in de tijd;
- stabiele bank positie (1 bank).

Grens wordt bepaald door verandering in offshore bathymetrie, maar overgang is redelijk geleidelijk. Overgang wordt ook bepaald door de daar aanwezige zeedijk. De verschillen in morfologie op de vooroever kunnen kleine verschillen in de nearshore golfcondities tijdens zware stormen veroorzaken. In regio 2 zijn in tegenstelling tot regio 3 wel terrassen aanwezig.

Regio 3: km 23 - km 55

- kustlijn achteruitgang en stabiele kustlijn positie; tijdelijke en ruimtelijke coherente fluctuaties in kustlijn positie en profielvorm;
- profiel steilheid fluctuaties over verschillende karakteristieke tijdschalen;
- periodiek gedrag van meervoudig banken systeem (2-3 banken), karakteristieke tijdschaal van 15 jaar.

Grens door havendammen van IJmuiden die tot een afstand van 2.5km zeewaarts liggen.

Regio 4: km 56 - km 98

- stabiele kustlijn positie met kleine fluctuaties van jaar tot jaar;
- stabiele profiel steilheid met kleine fluctuaties van jaar tot jaar;
- periodiek gedrag van meervoudig banken systeem (2-4 banken), met een karakteristieke tijdschaal van 4 jaar.

Deze overgang wordt bepaald door een strook met en één zonder strandhoofden.

Regio 5: km 98 - km 118

- kleine kustlijn fluctuaties, behalve plaatselijk aanzienlijk grote kustlijn propagatie door uitbreiding havendammen bij Scheveningen (km 102) en Hoek van Holland (km 119) en grootschalige strandsuppleties;
- profiel steilheid fluctuaties (gerelateerd aan menselijke tussenkomst);
- soms zijn er enkele banken aanwezig.

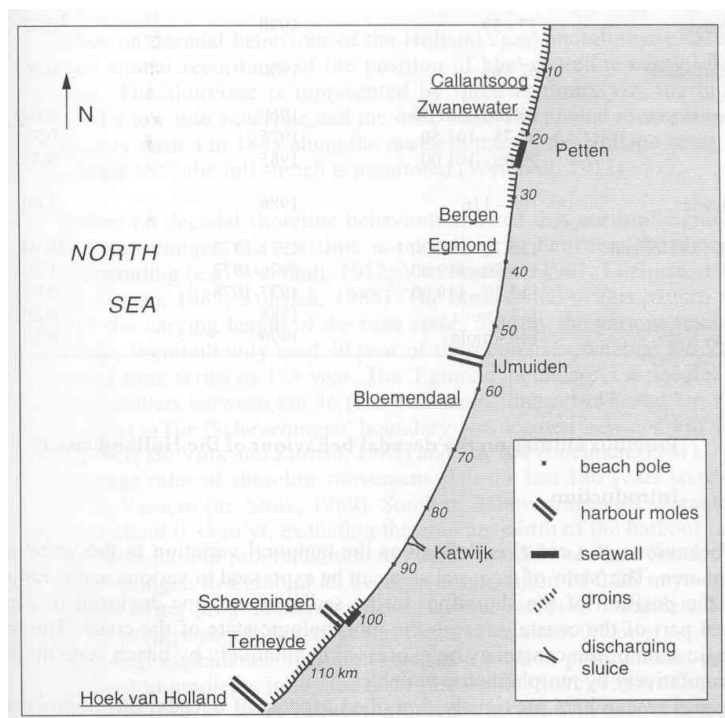
Met betrekking tot de beïnvloeding door de buitendelta is de Noord-Hollandse kust op te delen in een aantal secties (Elias et al., 2002). Een sectie (1a) die direct beïnvloed wordt door de buitendelta, een sectie (1b) die indirect beïnvloed wordt, en een sectie (2) die geen invloed ondervindt van de buitendelta (zie Figuur 3-11).

3.6 Civiele constructies

De eerste menselijke ingrepen op de ontwikkeling van de Hollandse kust dateren uit de Middeleeuwen. Sindsdien hebben er nog veel ingrepen plaats gevonden, zoals de aanleg van havendammen en strandhoofden (zie Tabel 3-6 en Figuur 3-12). De laatste decennia zijn er echter weinig harde constructies bijgekomen, wat samenhangt met het nieuwe kustbeleid. Bij dit kustbeleid worden eerst naar oplossingen gezocht met behulp van zachte constructies, zoals suppleties en worden de natuurlijke processen zo min mogelijk verstoord.

	Activiteit	Periode	ruimtelijke schaal
<i>Kademuren</i>			
Hondsbossche- en Pettemer zeewering (km 20-26)	Constructie	± 1550	?
	herlocalisering	1823	6 km (in langsrichting)
	Uitbreiding	1954	tussen km 25.8-26.2
	Uitbreiding	1969	tussen km 20.3-21.2
Scheveningen (km 102)	Constructie	1895/1896	140 m (in langsrichting)
	Uitbreiding	1896, 1902, 1907	totale lengte: 2.5 km (in langsrichting)
<i>Strandhoofden</i>			
km 2- km 31	Constructie	1838-1935	200-300m (cross-shore)
km 98- km 118	Constructie	1776-1896	200-300m (cross-shore)
<i>Havendammen</i>			
Ijmuiden (km 55/56)	Constructie	1865-1879	1.5 km (cross-shore)
	Uitbreiding	1962-1967	zuidelijke dam + 1.5 km noordelijke dam + 1 km
Scheveningen (km 102)	Constructie	1900-1908	250 cross-shore
	Uitbreiding	1969-1970	verlenging tot 650m
Hoek van Holland (km 118)	Constructie	1864-1874	1800 km (cross-shore)
	Uitbreiding	1968-1972	noordelijke dam + 2400m
<i>Afvoer sluizen</i>			
Katwijk (km 86)	Constructie	1807	-
	vergroting capaciteit debiet	1984	-

Tabel 3-6: Civiele constructies langs de Hollandse kust met jaar van constructie en afstanden tot Den Helder (bewerkt naar Wijnberg, 1995 en Steetzel, 1999)



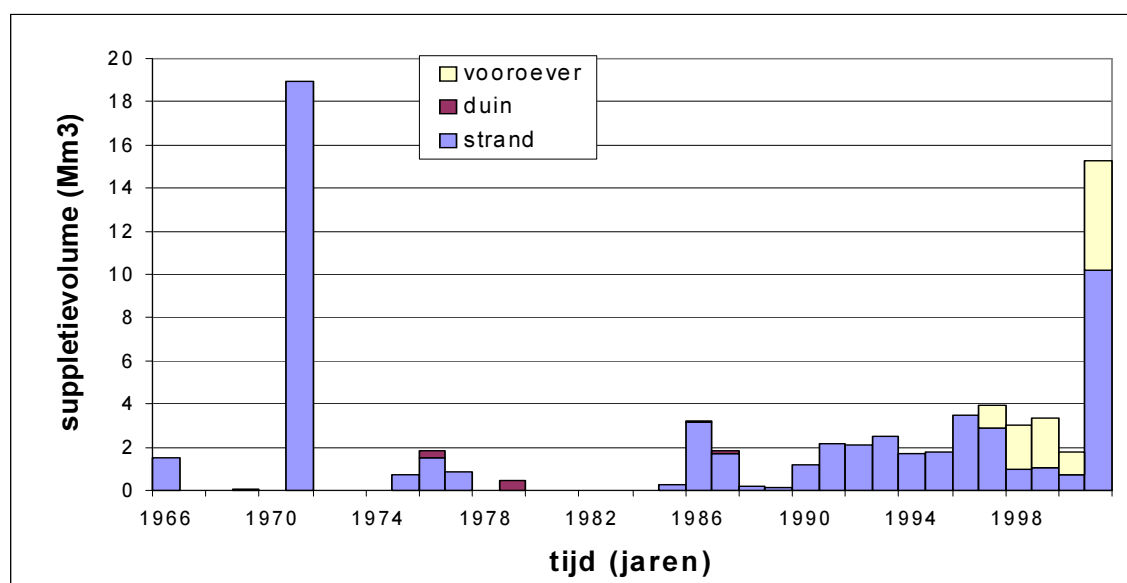
Figuur 3-12: Overzicht locaties van civiele werken langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995)

3.7 Suppleties, baggeren, dumping

Voor het dynamisch handhaven van de kustlijn wordt vooral gebruikt gemaakt van zandsuppleties. Het zand dat gesuppleerd wordt komt van de bodem van de Noordzee op dieper water (zeewaarts van de 20m dieptelijn) en uit de vaargeulen, zoals de IJgeul en de Euromaasgeul. De laatste jaren worden er vooral suppleties op de vooroever in plaats van op het strand uitgevoerd (Figuur 3-13), vanwege de lagere kosten en om meer met de natuur mee te werken. De omvang van de suppletie hoeveelheden is de laatste jaren sterk toegenomen. De gemiddelde suppletie behoefte van de Hollandse kust voor de periode 2000-2040 is geschat op 4.3 Mm³/jaar (Mulder, 2000). Hierbij worden eerst de verliezen in de ondiepe zone gecompenseerd en indien de resterende zandbalans van het deelsysteem een negatief saldo blijft houden wordt dit verlies ook gecompenseerd.

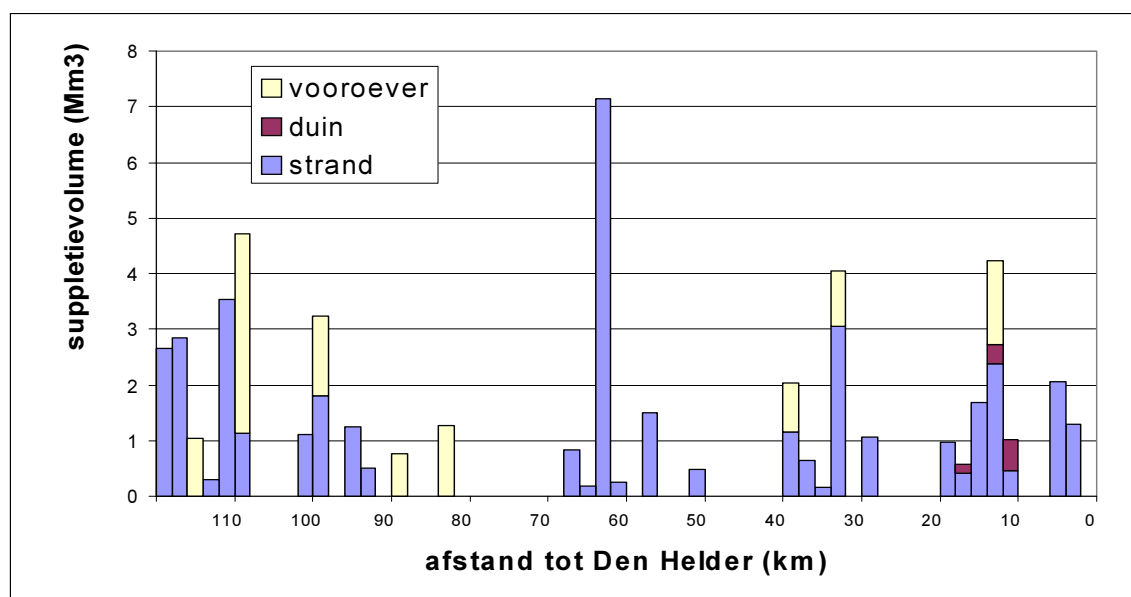
type suppletie	totaal volume [m ³]
strand	59.792.551
duin	1.044.913
vooroever	11.430.047
overig	140.000
Totaal	72.407.511

Tabel 3-7: Suppletie volumes langs de Hollandse kust in de periode 1953-2001



Figuur 3-13: Overzicht suppleties langs de Hollandse kust over de periode 1966-2001

Het merendeel van de suppleties heeft plaatsgevonden bij Hoek van Holland (km 115-118), Scheveningen (km 99-101), bij IJmuiden (km 56-64) en in enkele plaatsen in Noord-Holland (Figuur 3-14). Het totale volume van de strandsuppleties is nog vele malen groter dan het totale volumes van de suppleties op de vooroever (Tabel 3-7). Vanwege het nieuwe kustbeleid waarbij indien er een gesuppleerd wordt, dit overal op de vooroever gebeurd en alleen als dit niet mogelijk is op het strand, zal dit waarschijnlijk in een aantal jaren verandert zijn. Een uitgebreid overzicht van alle suppleties en baggervolumes langs de Hollandse kust is te vinden in bijlage 1.



Figuur 3-14: Overzicht suppletie volumes Hollandse kust (uitgezonderd de 19 Mm³ van de van Dixhoorn Driehoek) over de periode 1953-2001

In 1971 is direct ten noorden van de noordelijke havenpier van Hoek van Holland een hoeveelheid van 18.94 Mm³ zand gestort, wat daarvoor uit de Euromaasgeul is gebaggerd. Hierdoor is de zogenaamde "Van Dixhoorn Driehoek" ontstaan. In de periode 1967-1996 is er uit de IJ-geul een volume van 3.3 Mm³ gebaggerd. Er zijn een aantal locaties op dieper water waar regelmatig zand uit de vaargeulen wordt gedumpt. De belangrijkste is Loswal Noord die ten noorden van Hoek van Holland ligt (km 115) op een diepte van 15 meter.

3.8 Rivierinvloeden

Aan de zuidelijke grens van de Hollandse kust stroomt de rivier de Rijn de Noordzee in. Het debiet van de Rijn bij Lobith varieert van 750 m³/s tot 12000 m³/s, met een gemiddelde van 2290 m³/s en een standaarddeviatie van 1250 m³/s (Roelvink, 2000). Een deel van het debiet stroomt uit in de Noordzee bij Hoek van Holland, stromend door de haven van Rotterdam. Het andere deel stroomt uit door het estuarium in het zuiden van de Hollandse kust. Het debiet door de Rotterdamse haven wordt door sluizen zoveel mogelijk constant op 1500 m³/s gehouden. De uitstroming van de Rijn veroorzaakt een dichtheidsgedreven circulatie voor de Hollandse kust. Deze circulatie veroorzaakt een landwaarts gerichte stroming aan de bodem van enkele cm's per seconde (Visser, 1993). De invloed van deze cross-shore circulatie hangt af van het debiet van de Rijn en de windomstandigheden, maar kan volgens Van Alphen (1988) tot 20 km noordwaarts reiken. Volgens de recentere studie van Roelvink (2000) reikt de cross-shore circulatie onder gemiddelde omstandigheden tot ongeveer Katwijk (km 85). Hieruit volgt dat er rekening moet worden gehouden dat het effect van dichtheidsgedreven circulatie door uitstroming van de Rijn in eerdere studies onderschat is.

4 Golven

4.1 Inleiding

De transporten in het kustgebied worden hoofdzakelijk bepaald door processen die door de natuur worden opgelegd. De drie voornaamste zijn de wind, getij en golven. In dit hoofdstuk worden de golven behandeld. Het golfklimaat van de Hollandse kust wordt hoofdzakelijk bepaald door het windklimaat (golven worden opgewekt door windstress op het zeeoppervlak) en de geometrie van het Noordzee bassin. Deining is minder van belang.

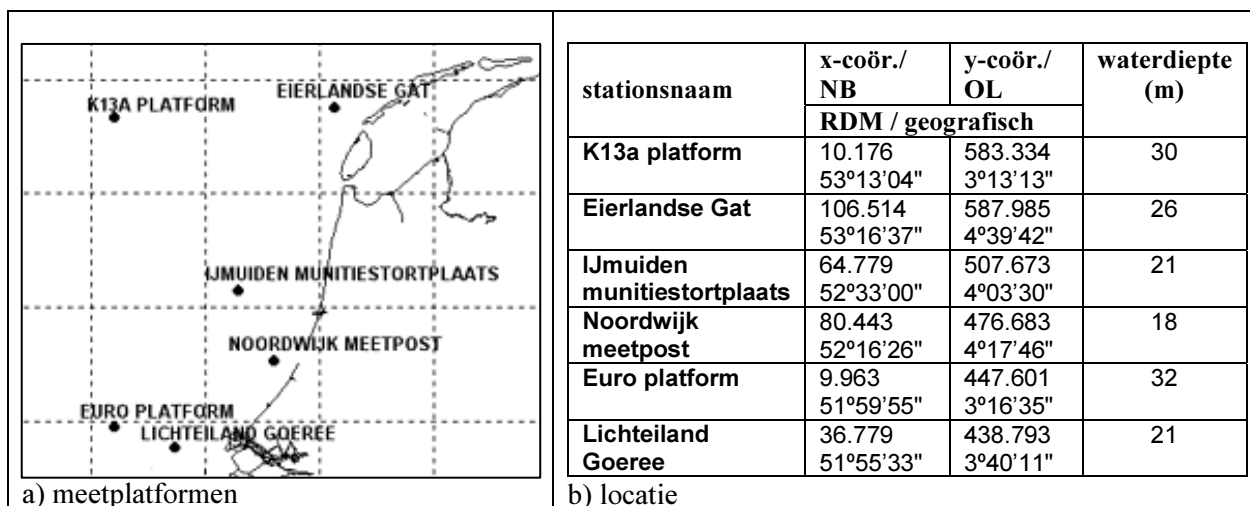
In dit hoofdstuk wordt een overzicht van de variatie van de golven langs de Hollandse kust gegeven, door de golfparameters van 4 verschillende meetstations (Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden) met elkaar te vergelijken. De meetreeksen van de golfhoogten en golfperioden lopen vanaf 1979, met uitzondering van het Euro platform, waar de metingen pas vanaf 1982 zijn begonnen. Na de invoering van de wavec-boei werd het ook mogelijk om golfrichtingen te meten. Bij Meetpost Noordwijk en het Euro platform worden de golfrichtingen vanaf 1985 gemeten en bij Eierlandse Gat en IJmuiden vanaf 1989. Golfrichtingen in de hier voorafgaande periode werden voorspeld vanuit de windrichtingen met behulp van empirische relaties tussen de wind -en golfrichtingen (Roskam, 1994). De data van de meetseries in deze studie lopen tot het jaar 2001.

4.2 Het meten van golven

Veel informatie uit deze paragraaf is ontleend aan: <http://www.golfklimaat.nl>.

4.2.1 Meetlocaties

De meetlocaties van waaruit golven gemeten worden liggen op relatief diep water, buiten de gebieden met migrerende banken en buitendelta's (Figuur 4-1). Daardoor worden de metingen weinig beïnvloed door diepte geïnduceerde processen en variabiliteit van de bodemtopografie.



Figuur 4-1: Overzicht belangrijkste golf meetlocaties langs de Hollandse kust

4.2.2 Meetmethoden

Het meten van golven op de Noordzee gebeurt met 3 verschillende typen meetinstrumenten, namelijk:

- baken (stappenbaak)
- boeien (waverider, wavec, directional waverider)
- radar

Baken: *Stappenbaken* zijn lange buizen, waaraan op regelmatige afstanden elektroden zijn bevestigd. Deze baken zijn gemonteerd aan platforms of meetpalen. Met behulp van elektronica wordt continue gemeten wat de hoogste elektrode is die zich nog onder water bevindt. Daarmee worden de veranderingen van het zeeoppervlak in de tijd vastgelegd en daaruit worden karakteristieken van de golfbeweging bepaald. Met een stappenbaak worden alleen golfhoogten en golfperioden gemeten, geen golfrichtingen.

Boeien: Van de drie genoemde boeien is de *waverider* de oudste. Deze meet geen richtingen. De boei is bolvormig met een diameter van iets minder dan 1 meter. De boei meet de versnellingen in verticale richting, die worden veroorzaakt door de golfkrachten op de boei. Hieruit kunnen de hoogteveranderingen van het zeeoppervlak worden berekend en daaruit kunnen weer golfkarakteristieken worden bepaald.

De *wavec-boei* is de oudste boei waarmee ook golfrichtingen kunnen worden gemeten. Deze boei is veel groter dan de *waverider* (diameter 2,5 m). De boei meet, naast de verticale versnellingen, ook hellingen van de boei onder invloed van de golfbeweging. Daarmee kunnen, behalve golfhoogte en golfperiode, ook karakteristieken van de voortplantingsrichting van de golven worden bepaald.

De *directional waverider* is de moderne versie van de *wavec* en werkt in principe hetzelfde, maar heeft de afmetingen van een gewone *waverider*.

Radar: De *golfradar* is een moderne versie van de stappenbaak. De radar staat opgesteld op een platform of op een meetpaal. De radarbundel is verticaal naar beneden gericht. Via reflectie wordt de afstand tussen radar en zeeoppervlak gemeten en daarmee wordt het golfbeeld vastgelegd.

In Tabel 4-1 is van de belangrijkste meetstations aangegeven welke methodieken worden gebruikt en wanneer met het meten begonnen is.

stationsnaam	hoofdsensor	Begin meting	neven sensor	begin meting
K13a platform	waverider / wavec / dir. waverider	21-03-1985	waverider	18-01-1979
Eierlandse Gat	waverider / wavec / dir. waverider	17-04-1989	waverider	13-09-1979
IJmuiden munitiestortplaats	waverider / wavec / dir. waverider	1-04-1989	waverider	12-01-1979
Noordwijk meetpost	stappenbaak / wavec / radar	20-03-1985	stappenbaak	1-01-1979
Euro platform	stappenbaak / wavec / dir. waverider	20-03-1985	stappenbaak / radar	19-11-1982
Lichteiland Goeree	stappenbaak / radar	1-01-1979	-	-

Tabel 4-1: Meetmethoden en -perioden van de belangrijkste golf meetlocaties langs de Hollandse kust

4.2.3 Verwerking meetresultaten

De golf meetsensor van de meetstations bepaalt enkele malen per seconde de hoogte van het zeeoppervlak, zet dit om in een radiosignaal en verzendt dit naar een verwerkingscentrum, waar de golven verwerkt worden. De verwerking bestaat allereerst uit een grondige controle van het binnenkomende signaal. Eenvoudige korte verstoringen van het signaal (orde 1 seconde) worden verbeterd, bij langer aanhoudende fouten of bij langdurige onderbrekingen in het signaal wordt de reeks of een deel van de reeks afgekeurd. Meetinstrumenten en telemetrie apparatuur op de meetlocaties vertonen zo nu en dan storingen. Door de moeilijke bereikbaarheid van de meetlocaties kan het soms geruime tijd duren voordat de noodzakelijke reparaties worden verricht. De uitval is daardoor vrij hoog, ongeveer 10% tot 20% van de tijd.

Nadat de binnengekomen meetsignalen zijn verwerkt worden via gestandaardiseerde methoden allerlei eigenschappen van het bemeten golfveld vastgelegd in een standaardset karakteriserende parameters. De waarden van de golfparameters worden steeds berekend over een tijdsduur van 20 minuten. Om de veranderingen van het golfveld goed te kunnen volgen dient deze duur zo kort mogelijk te zijn, maar de nauwkeurigheid van de berekende golfparameters wordt beter naarmate de meetduur langer wordt. De meetduur van 20 minuten is voor het beschouwde meetgebied het optimum tussen nauwkeurigheid en veranderlijkheid. De waarden van die parameters worden in een standaard formaat opgeslagen (DONAR en de website: <http://www.golfklimaat.nl>), zodat deze eenvoudig beschikbaar zijn voor de gebruikers. De standaard voor de opslag van golfgegevens voor golfklimatologie bestaat uit het energiedichtheidsspectrum, het golfrichtingsspectrum en acht veel toegepaste parameters. De opgeslagen gegevens van de spectra hebben een tijdstap van 3 uur, voor de parameters is dat 1 uur.

In de jaren tachtig is de Wavec-boei ontwikkeld. Daarmee kunnen ook golfrichtingen worden gemeten. Dit betekende een aanzienlijke uitbreiding en verbetering van het meten van golven. De analyse van de richtingsmetingen gebeurt geheel in het frequentiedomein. Naast het gebruikelijke energiedichtheidsspectrum worden ook het richtingspectrum en het richtingspreidingspectrum bepaald en hieruit weer veel andere parameters.

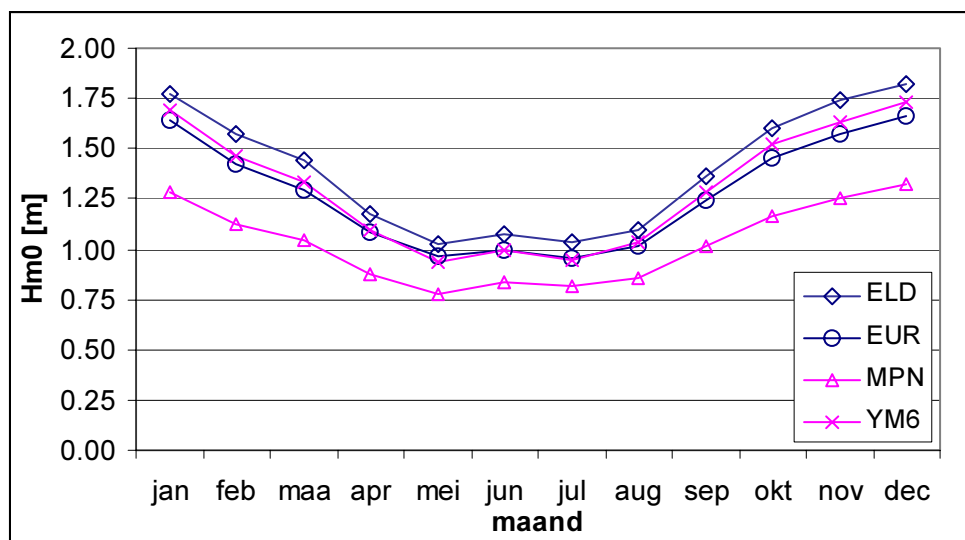
Deze precisie van de parameters worden maar voor een klein deel bepaald door de meetnauwkeurigheid van de boeien en baken. De meetnauwkeurigheid is over het algemeen ruim voldoende. Bepalend voor de nauwkeurigheid van de golfparameters is hoofdzakelijk de nauwkeurigheid, waarmee het bemeten stukje van het zeeoppervlak maatgevend is voor de gehele toestand van de zee op die locatie. Er bestaan enkele eenvoudige vuistregels voor de nauwkeurigheid van golfparameters, aangegeven door de relatieve standaard afwijking (Tabel 4-2) :

parameter	relatieve standaard afwijking
Hm0 en H1/3	5 %
HTE3	7.5 %
Tm02 en Th1/3	2.5 %

Tabel 4-2: relatieve standaard afwijking van golfparameters

4.3 Golfhoogte verdeling over het jaar

De seizoensvariatie van stormen uit het windklimaat worden duidelijk gereflecteerd in het golfklimaat. In de stormachtige wintermaanden (november - januari) is de maandelijks gemiddelde golfhoogte (H_{m0}) ongeveer 1.7m, terwijl in de zomermaanden (april - augustus) de maandelijks gemiddelde golfhoogte ongeveer 1m is (zie Figuur 4-2).

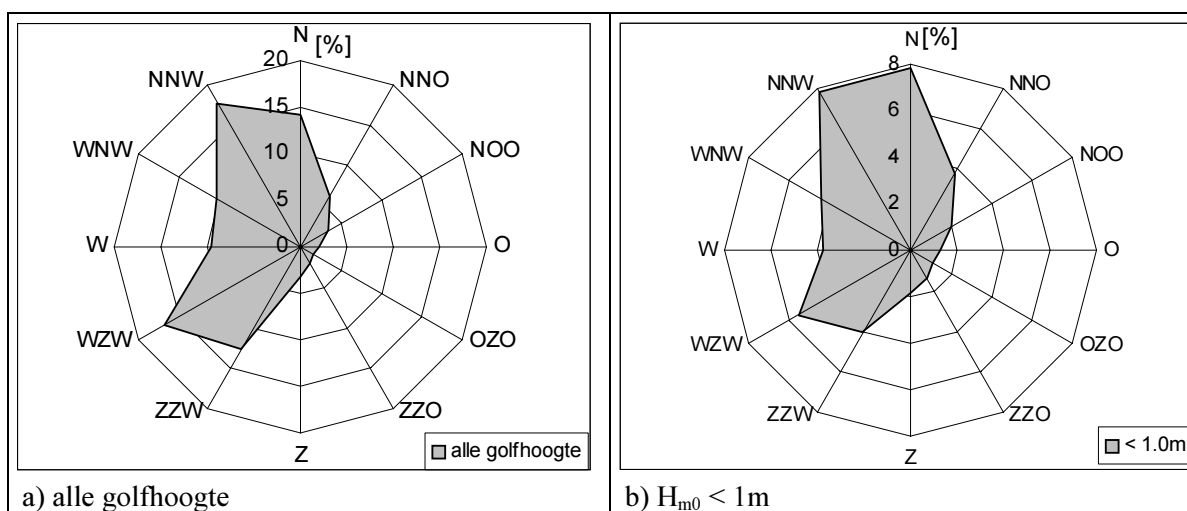


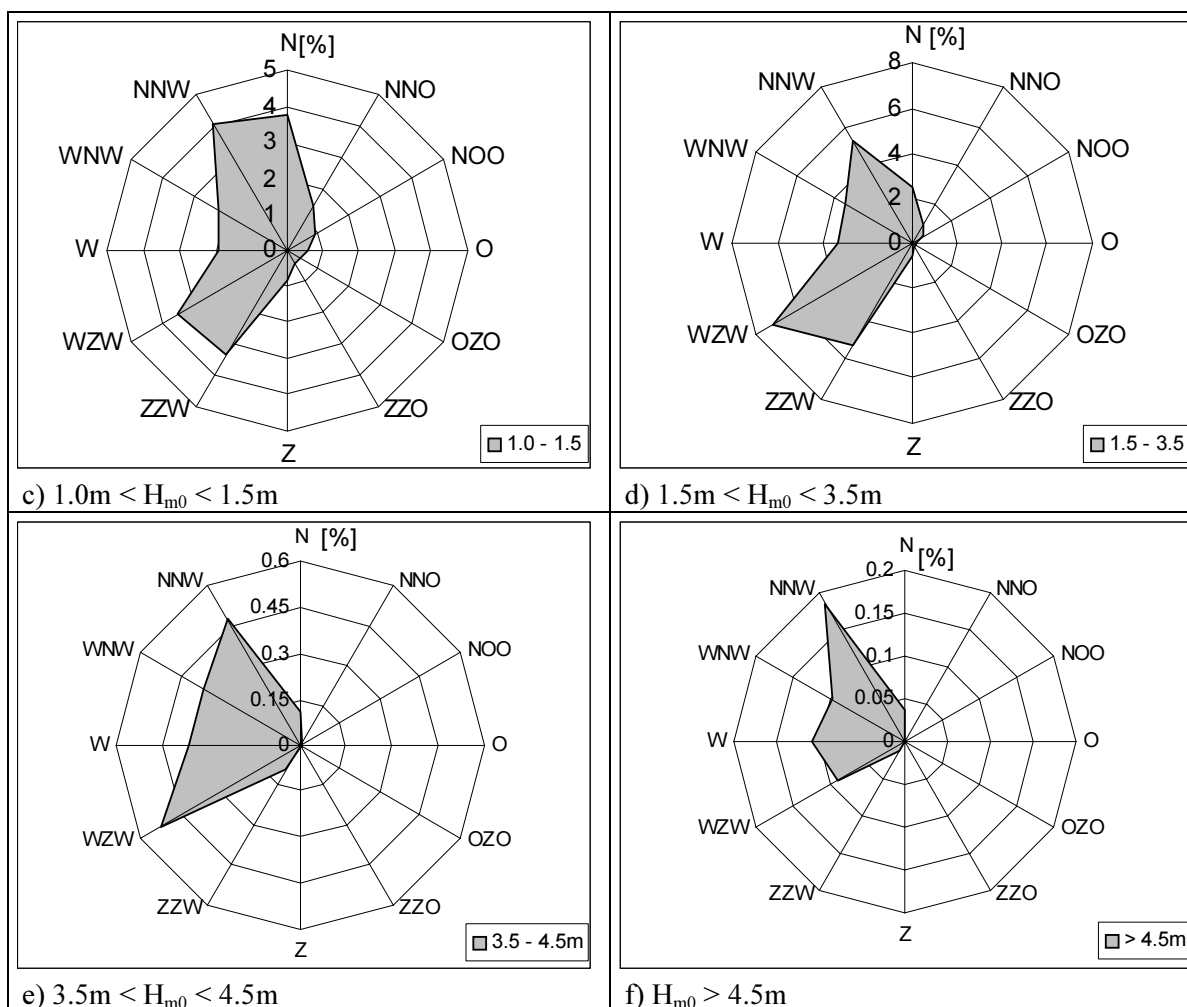
Figuur 4-2: Maandelijkse gemiddelde golfhoogte voor de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden

4.4 Golfhoogte verdeling per richting

De golven langs de Hollandse kust komen voor 80- 85 % uit de richting tussen 195° en 15° t.o.v. het noorden, met uitschieters vanuit zuidwestelijke en noordnoordwestelijke richting (zie Figuur 4-3 (a)). Het percentage van voorkomen van golven per golfrichting klasse in Figuur 4-3 zijn weergegeven voor meetstation IJmuiden, vanwege de centrale ligging van deze meetlocatie. Strijklengtes voor golven vanuit oostelijke richtingen zijn begrensd door de kust, waardoor de golfhoogten vanuit deze richting significant kleiner zijn. Gedurende rustige periode ($H_{m0} < 1m$) benaderen golven de kust meestal uit noordnoordwestelijk richting. Gedurende "normale" stormomstandigheden ($1.5m < H_{m0} < 3.5m$) benaderen golven de kust meestal uit zuidwestelijke en noordwestelijke richting. Gedurende "extreme" stormcondities ($H_{m0} > 4.5m$) zijn de dominante golfrichtingen west en noordwest.

Een totaal overzicht van de golfrichtigingsverdeling per golfhoogte klasse voor de meetstations ELD, EUR, MPN en YM6 is te vinden in bijlage 2.





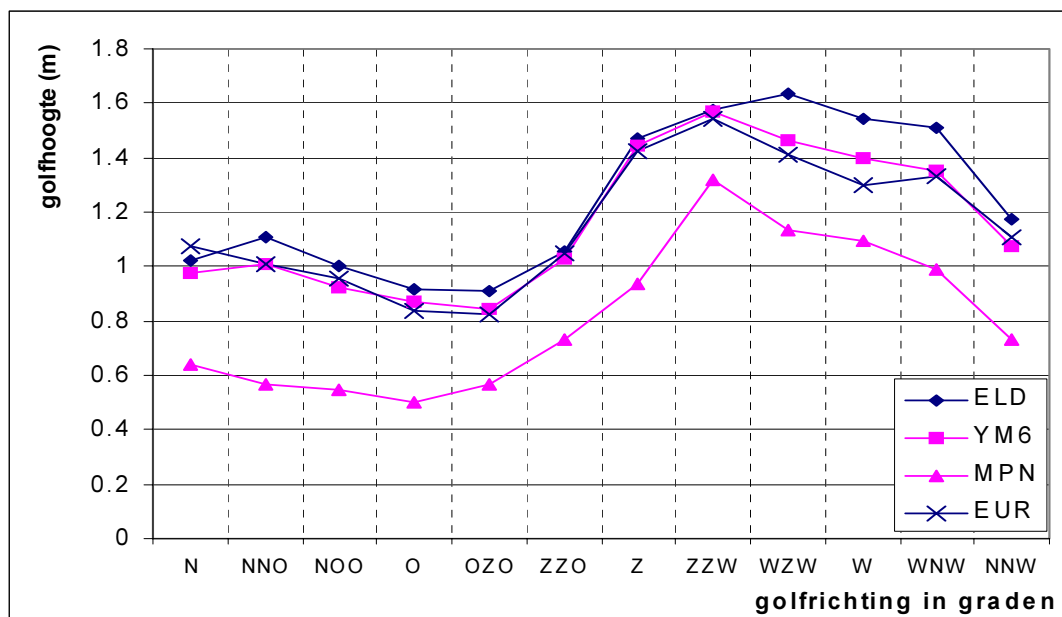
Figuur 4-3: Percentage van voorkomen van golven per golfrichting op meetpost IJmuiden verdeelt over 5 golfhoogte klasse

4.5 Golfklimaat variaties langs de kust

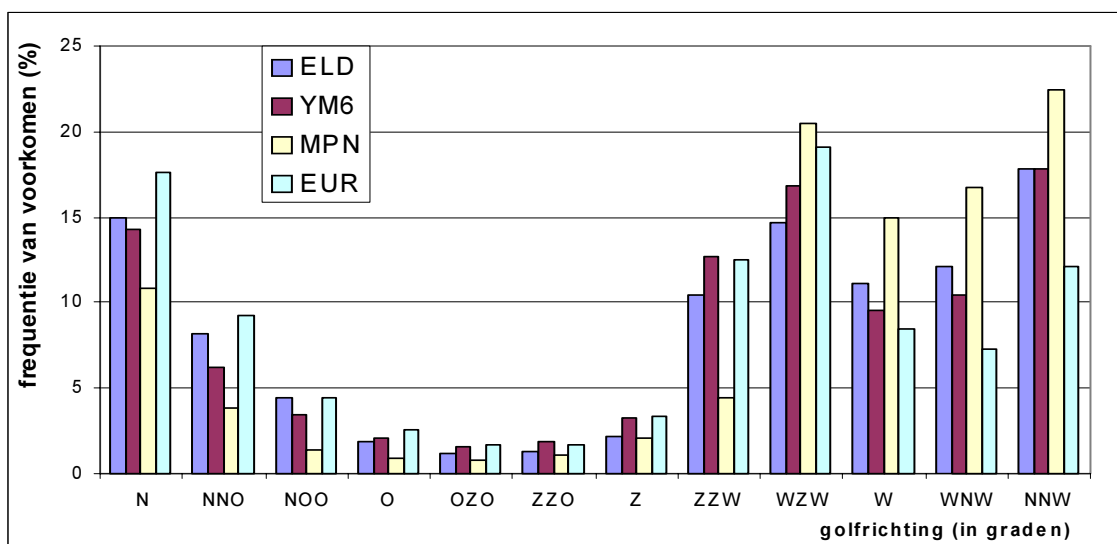
4.5.1 Variatie langs de kust

Het offshore golfklimaat is redelijk constant langs de Hollandse kust. De gemiddelde maandelijkse golfhoogte (H_{m0}) en de gemiddelde jaarlijkse golfhoogte per richtingssector variëren vooral weinig voor de meetstations Euro platform, en IJmuiden (Figuur 4-2 en Figuur 4-4). De golven bij Meetpost Noordwijk en Eierlandse Gat wijken hier echter meer vanaf. De golfhoogte bij Meetpost Noordwijk is gedurende het hele jaar en over alle golfrichtingen lager dan op de andere meetlocaties. In het geval van afluiddige wind kunnen deze lagere golfhoogte verklaard worden door de kortere strijklengte door de kortere nabijheid van de kust. Bij kustwaarts gerichte wind kan de lagere golfhoogte mogelijk verklaard worden door refractie en energie dissipatie door bodemwrijving, doordat de waterdiepte bij MPN kleiner is dan bij de andere meetstations (Wijnberg, 1995).

Bij het Eierlandse Gat wijkt de hoogte van de golven weinig af van die bij EUR en YM6 voor meeste golfrichtingen. Echter bij de golfrichtingen west en noordnoordwest, zijn de golven significant hoger door de grotere strijklengte.



Figuur 4-4: Jaarlijks gemiddelde golfhoogte (Hm0) per richtingssector op de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden



Figuur 4-5: Frequentie van voorkomen van golfhoogte per golfrichting voor de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden

Uit de frequentie bijdrage van de verschillende golfrichtingen (Figuur 4-5) is waar te nemen, dat er zuidwaarts een vermindering van golven uit de richting west en noordnoordwest is, samengaand met een kleine vergroting van golven uit de richtingen westzuidwest en het noorden. Alleen Meetpost Noordwijk wijkt weer van dit patroon af. Ook wordt de hoogte van deining minder richting het zuiden en is het hoogste bij meetpost ELD (zie paragraaf 3.7).

De extreme golven zijn hoger bij de noordelijke gelegen stations. De overschrijdingsfrequentie van $H_s = 5\text{ m}$, is 0.37% bij ELD, 0.22% bij YM6, 0.08% bij EUR en 0.07% bij MPN. De hogere golven in het noorden komen door de meer blootgestelde locatie van de noordelijke stations voor noordwestelijke winden. De hoogste golven benaderen de kust vanuit noordwestelijke richting en zijn 7.5-8.0 m hoog bij ELD, 7.0-7.5 m hoog bij YM6 en 6.0-6.5 m hoog bij meetstation EUR.

Voor een totaal overzicht van verscheidene golfparameters zie Tabel 4-3.

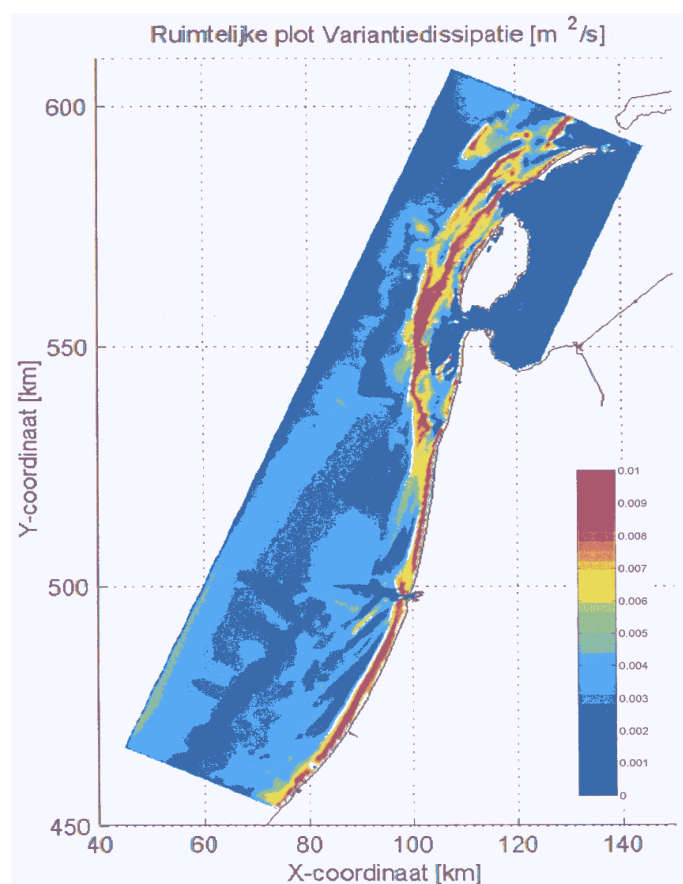
	Hm0 (m)	H 1/3 (m)	HE10 (m)	Tm02 (s)	TH 1/3 (s)
ELD	1.39	1.30	0.29	4.77	5.84
YM6	1.30	1.23	0.25	4.61	5.54
MPN	1.03	1.01	0.17	4.37	5.25
EUR	1.27	1.21	0.17	4.37	5.24

Tabel 4-3: Overzicht van golfparameters bij de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden

4.5.2 Effect van bodemdiepte op het golfklimaat

Tot nu toe zijn alleen golven op relatief diep water behandeld, maar voor de transporten langs de Hollandse kust zijn golven op ondiep water meer van belang. In ondiep water varieert het golfklimaat langs de kust meer dan op diep water, door allerlei ondiep water effecten, zoals shoaling, refractie, diffractie, dissipatie en het breken van golven. Bovendien varieert de oriëntatie van de kustlijn langs de kust, waardoor gradiënten in het langtransport ontstaan.

Indien de golfhoogte van de verschillende meetstations met elkaar worden vergeleken valt op dat deze bij Meetpost Noordwijk (18m diepte) significant lager zijn (Figuur 4-4). Hieruit blijkt dat zelfs op 18 meter diepte het effect van het ondiepere water dus al goed waarneembaar is.



Figuur 4-6: Variantiedissipatie langs de Hollandse kust voor golven uit het westen (Mus, 2003)

Uit het werk van Mus (2003), die gebruik heeft gemaakt van het ondiep water golfmodel "SWAN", is het effect van bodemdiepte fluctuaties op de golfhoogte ook goed waar te nemen. Bij het naderen van de kust breken de golven, wat gepaard gaat met energiedissipatie. Deze

energie-dissipatie is recht evenredig met de variantiedissipatie. De variantiedissipatie langs de Hollandse kust is weergegeven in Figuur 4-6, waarbij als randvoorwaarde een storm uit westelijke richting met een significante golfhoogte van 9,3 m is genomen (Mus, 2003). In de kustsecties ten zuiden van de Pettemer Polder vindt de meeste variantiedissipatie plaats in de brekerzone. Dit betekent dat de golfaanval op de kust hier relatief groot is. Ten noorden van de Pettemer Polder vindt de meeste breking plaats op de ondieptes, enkele kilometers voor de kust. De buitendelta en de ondieptes voor de Texelse kust werken hier als een soort golfbreker, waardoor de golfaanval op de kust een stuk kleiner is. De invloed van de buitendelta op de golfhoogte is tot de Pettemer Polder waarneembaar. Door de ligging van het Noorderhaaks ligt de kustsectie direct ten zuiden van het Marsdiep estuarium in geval van noordwester stormen meer beschermd tegen golfaanval, dan in het geval van zuidwester stormen.

In het project COAST3D (van Rijn, 2000) zijn bij Egmond veel metingen gedaan van golven in een dwarsprofiel loodrecht op de kust. In het dwarsprofiel waren op deze locatie twee brekerbanken aanwezig op een diepte van respectievelijk 1 en 3 meter t.o.v. NAP. Er is een vergelijking gemaakt van de golfhoogte vermindering bij nadering van golven vanaf diep water naar de kust. De gemeten golven op diep water (10c, Europlatform) de vooroever (8) en de brekerzone (de stations 1a-d) zijn te zien in Tabel 4-4. De gemeten golfhoogte bij station 10c is daarbij als 100% genomen en de golfhoogte in de andere stations zijn relatief t.o.v. van station 10c.

	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	>5.0m
10c	100	100	100	100	100	100	100
8	86	81	75	81	84	88	84
2	80	-	65	67	66	63	55
1a	60	61	57	53	44	43	37
1b	57	56	44	42	38	39	36
1c	55	56	42	37	29	31	27
1d	52	53	40	34	25	26	23

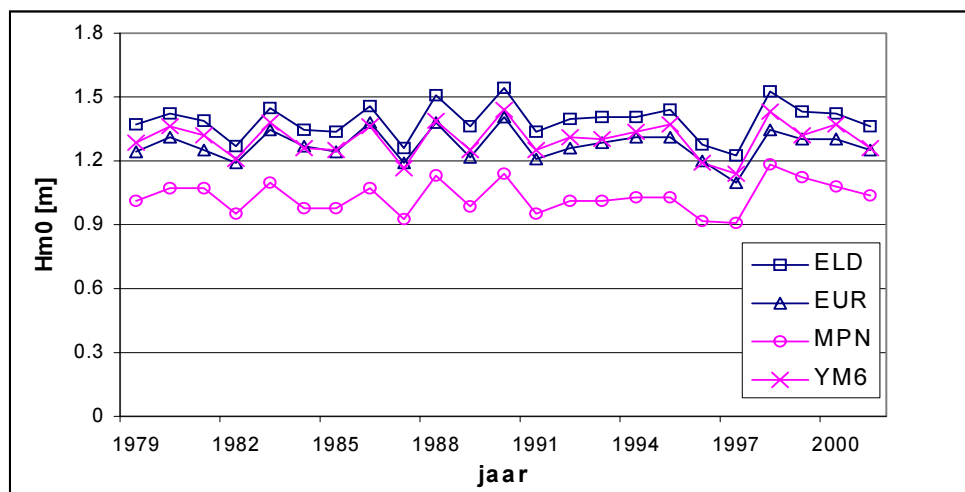
Tabel 4-4: Relatieve golfhoogte t.o.v. diep water golfhoogte voor verschillende golfhoogte klassen (persoonlijke communicatie, Elias)

4.6 Verandering van golfklimaat in de tijd

De gemiddelde golfhoogte is redelijk constant in de tijd (Figuur 4-7), echter is er wel een verandering van de significante golfrichting waar te nemen. Het golfklimaat van 1980-1988 laat in vergelijking tot het golfklimaat van 1980-1998 iets minder golven uit zuidwestelijke en iets frequenter golven uit noordwestelijke richting zien (Roelvink, 2000).

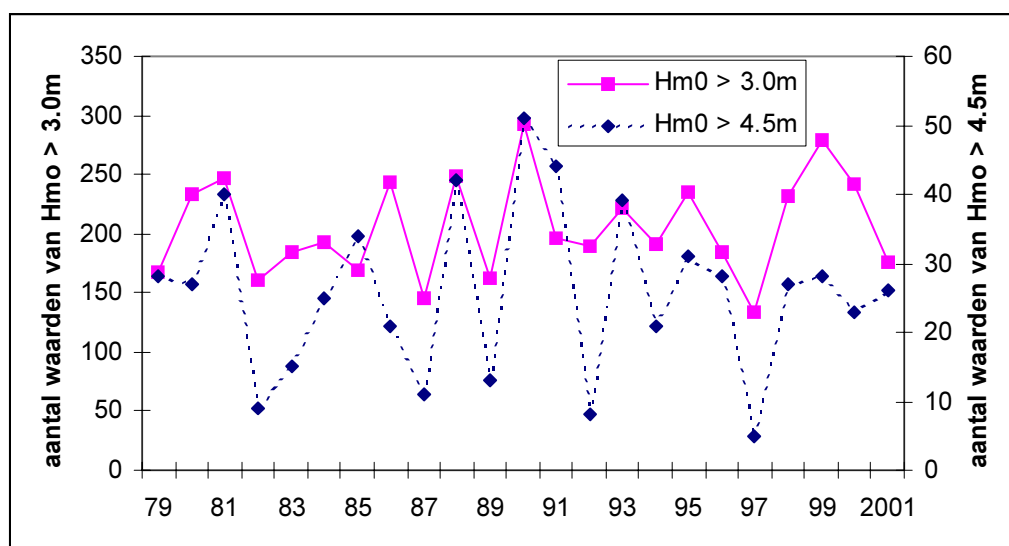
jaar	$H_{m0} > 3.0m$	$H_{m0} > 4.5m$	jaar	$H_{m0} > 3.0m$	$H_{m0} > 4.5m$
1979	168	28	1991	196	44
1980	234	27	1992	189	8
1981	247	40	1993	221	39
1982	161	9	1994	191	21
1983	184	15	1995	235	31
1984	192	25	1996	184	28
1985	169	34	1997	134	5
1986	244	21	1998	231	27
1987	146	11	1999	279	28
1988	249	42	2000	242	23
1989	163	13	2001	176	26
1990	293	51	gemiddeld	206	26

Tabel 4-5: Aantal waarden van H_{m0} over een periode van 3 uur bij meetpost K13, die groter zijn dan respectievelijk 3.0 en 4.5 m



Figuur 4-7: Jaarlijkse gemiddelde golfhoogte voor de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden

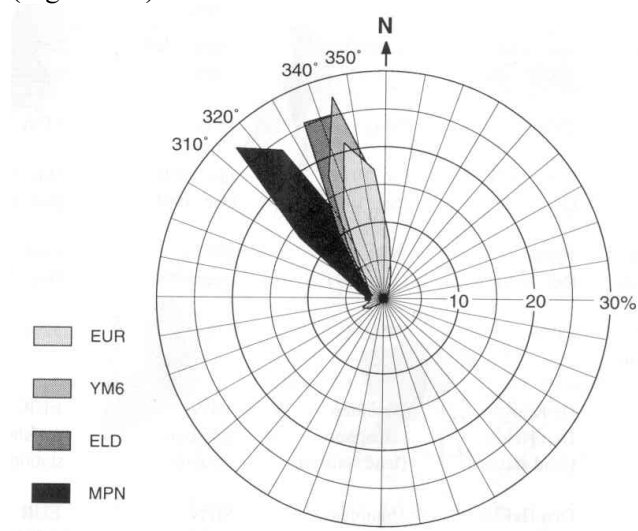
De frequentie van het aantal relatief hoge golven hangt samen met het aantal stormen wat is opgetreden. Een evaluatie van het aantal stormen in de tijd volgt in paragraaf 5-3. In Tabel 4-5 en Figuur 4-8 is een vergelijking van de frequentie van het aantal relatief hoge golven over de periode 1979-2001 van meetpost K13 gemaakt. Hierbij zijn met behulp van data van de site: www.golfklimaat.nl, de waarden van H_{m0} gegeneerd met een tijdstap van 3 uur over de gehele periode van 1979-2001. Vervolgens is gekeken wat de frequentie is binnen een jaar, dat H_{m0} boven een waarde van respectievelijk 3.0m en 4.5m uitkomt. De verschillen per jaar blijken vrij groot te zijn, vooral bij vergelijking van de frequenties van $H_{m0} > 4.5m$. Bij vergelijking van de frequentie van $H_{m0} > 4.5m$ in het jaar 1990 met het jaar 1992 zit een factor 6 verschil. Bij vergelijking van $H_{m0} > 3.0m$ over dezelfde jaren bestaat echter nog maar een verschil van een factor 1.55. De frequenties van deze golfcondities schommelen echter om een trendlijn die vrijwel horizontaal loopt. Het aantal relatief hoge golven is dus over de gehele periode 1979-2001 vrij constant te noemen, alleen de jaarlijkse variaties zijn vrij groot.



Figuur 4-8: Aantal waarden van H_{m0} over een periode van 3 uur bij meetpost K13, die groter zijn dan respectievelijk 3.0 en 4.5 m

4.7 Laagfrequente golven (deining)

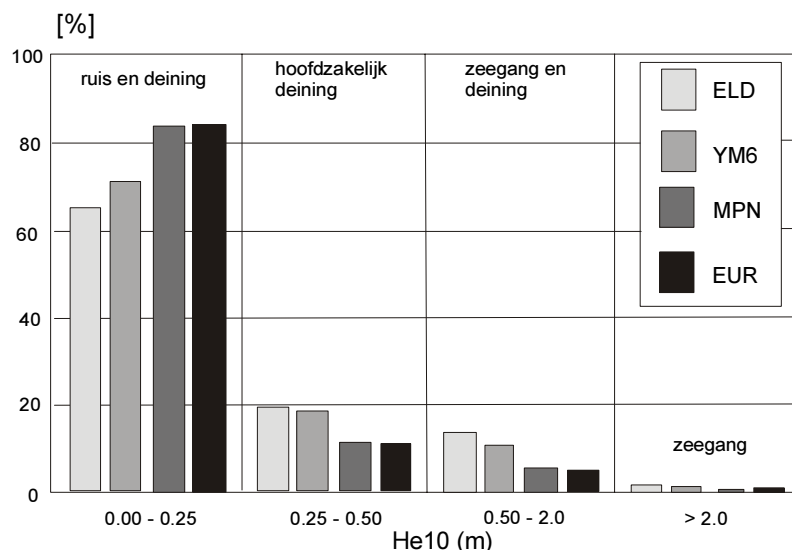
Soms komen er tamelijk hoge golven voor zonder dat er sprake is van storm of harde wind in het betreffende gebied. Dit wordt veroorzaakt door deining. Deining is een golfveld dat niet langer onder invloed staat van een windveld, waardoor het is opgewekt. Dit komt doordat het golfveld het windgebied heeft verlaten, of omdat het windgebied niet meer bestaat. Daarbij neemt de golfhoogte geleidelijk af en wordt de golfperiode steeds langer. Op een oceaan kan deining dagen voortlopen en uit allerlei richtingen komen. Door de geometrie van het Noordzee bassin kan deining die opgewekt is op de Atlantische Oceaan en de noordelijke Noordzee alleen uit de noordelijke richtingen komen en is dan zelden ouder dan een dag (Figuur 4-9).



Figuur 4-9: Richtingsverdeling van laagfrequente golfenergie (0.03-0.10Hz) van de meetstations Eierlandse Gat, Euro platform, meetpost Noordwijk en IJmuiden (Wijnberg, 1995)

De golven die gemeten worden in de zuidelijke Noordzee vormen altijd een vermenging van windgolven en deining. Tijdens stormen zijn windgolven altijd dominant. Onder rustige omstandigheden is de invloed van de deining vaak zichtbaar, vooral in de golfperiode. Golven door deining zijn regelmatig en langkammig, terwijl windgolven veel onregelmatiger zijn en kortkammig. De aanwezigheid van deining is moeilijk uit de data sets te halen. Volgens Roskam (1988) is energie in de lage frequentie band van het golfspectrum (0.03-0.10 Hz) een indicator van deining. Analyses van dit deel van het spectrum duiden op deining in 20% van de tijd.

De kennis van de variatie van deining langs de kust is zeer beperkt. Figuur 4-10 geeft een indruk van de verschillen in deininggerelateerde golfenergie langs de kust. Deze figuur laat de frequentie van voorkomen zien van 4 klassen van H_{E10} van 4 meetstations in de Noordzee. H_{E10} is een maatstaf voor laagfrequente golfenergie, uitgedrukt in termen van golfhoogte (Roskam, 1988). In de figuur is te zien dat bij meetpost ELD de H_{E10} klasse met voornamelijk deining veel vaker waar wordt genomen, als bij meetpost EUR. Bovendien is de gemiddelde waarde van H_{E10} in het zuiden (EUR) lager dan in het noorden (ELD). Dit duidt erop dat de deining lager wordt in zuidelijke richting. Dit kan veroorzaakt worden door een combinatie van energie dissipatie (door bodemwrijving) en refractie.



Figuur 4-10: Frequentie verdeling van H_{E10} op de meetstations ELD, YM6, MPN en EUR

4.8 Windinvloeden

Hoewel golven door wind worden opgewekt zijn de golfrichtingen niet gelijk aan de windrichtingen. De golfrichtingen worden uiteraard sterk beïnvloed door de windrichting, maar ook door de bodemtopografie, stromingen en de al aanwezige, oudere golfenergie. Voor de afhankelijkheid van de golfrichting van frequenties geldt in het algemeen (Roskam, 1988):

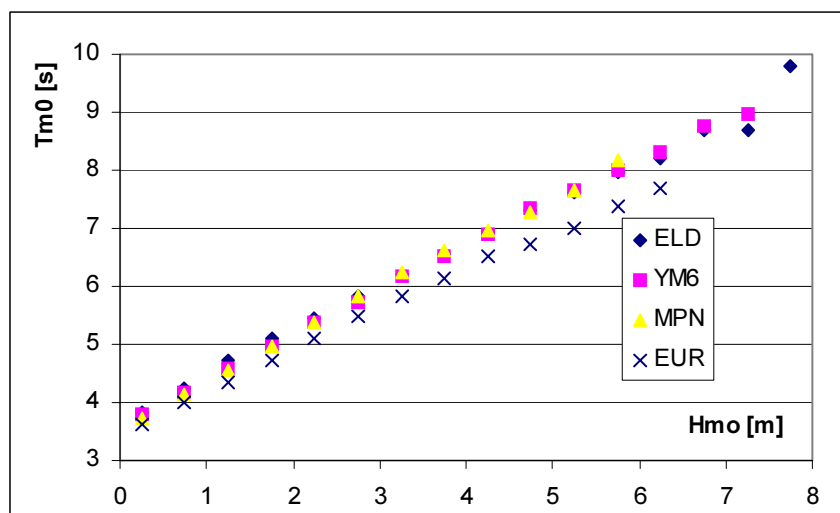
- bij hele hoge frequenties ligt de gemiddelde golfrichting dicht bij de windrichting (jonge zeegang, dus sterk afhankelijk van recente wind);
- bij hele lage frequenties is de golfrichting altijd noordelijk (oude zeegang, ofwel deining, ontstaan door wind in het verleden kan in de zuidelijke Noordzee alleen maar uit het noorden komen);
- bij tussen liggende frequenties zijn vaak golfvelden van draaiende windvelden aanwezig.

De hoogste golven ontstaan door wind uit het noorden door de grote strijklengte. Een groter wordende windsnelheid veroorzaakt hogere golven en langere golfperiodes, en in het bijzonder in het geval bij windrichtingen die uit de noordelijke richtingen komen.

4.9 Golfperiodes

De gemiddelde golfperiode T_{m02} neemt richting het zuiden van de Hollandse kust langzaam af. Bij de meetpost ELD is T_{m02} 4.77s, bij YM6 4.61s en bij de meetposten EUR en MPN is deze 4.37s. De gemiddelde golfperiode neemt gemiddeld genomen lineair toe met de gemiddelde golfhogten (Figuur 4-11). Bij de meetstations ELD, MPN en YM6 is deze lineaire toename vrijwel gelijk. Bij meetpost Europoort is de golfperiode die bij een bepaalde golfhogte hoort echter kleiner dan bij de andere meetlocaties. Dit betekent dat de golven hier een grotere golfsteilheid hebben. Deze grotere steilheid kan worden verklaard door het relatief grotere aandeel van golven door lokale zeegang t.o.v. golven door deining. In bijlage 2 is een uitgebreid overzicht van de golfperiode per golfrichting voor verschillende golfhogte klasse te vinden.

Bij veiligheidsberekeningen van de kust wordt meestal de golfperiode T_p gebruikt, ofwel de piekperiode. De piekperiode is de periode, behorend bij de grootste energiedichtheid in het spectrum. De waarde van T_p wordt berekend als $1/f_p$; f_p is de frequentie waarbij de energiedichtheid $S(f)$ maximaal is. De piekperiode en de gemiddelde golfperiode zijn ongeveer lineair evenredig met elkaar volgens de formule: $T_p = 1.3 T_{m02}$.



Figuur 4-11: Golfperiode uitgezet tegen de golfhoogte

De extreme waarden van de golfperioden zijn weergegeven in Tabel 4-6. Hierbij is hetzelfde beeld te zien als bij de gemiddelde waarden van de golfperioden, namelijk een kleiner wordende periode bij de zuidelijker gelegen stations.

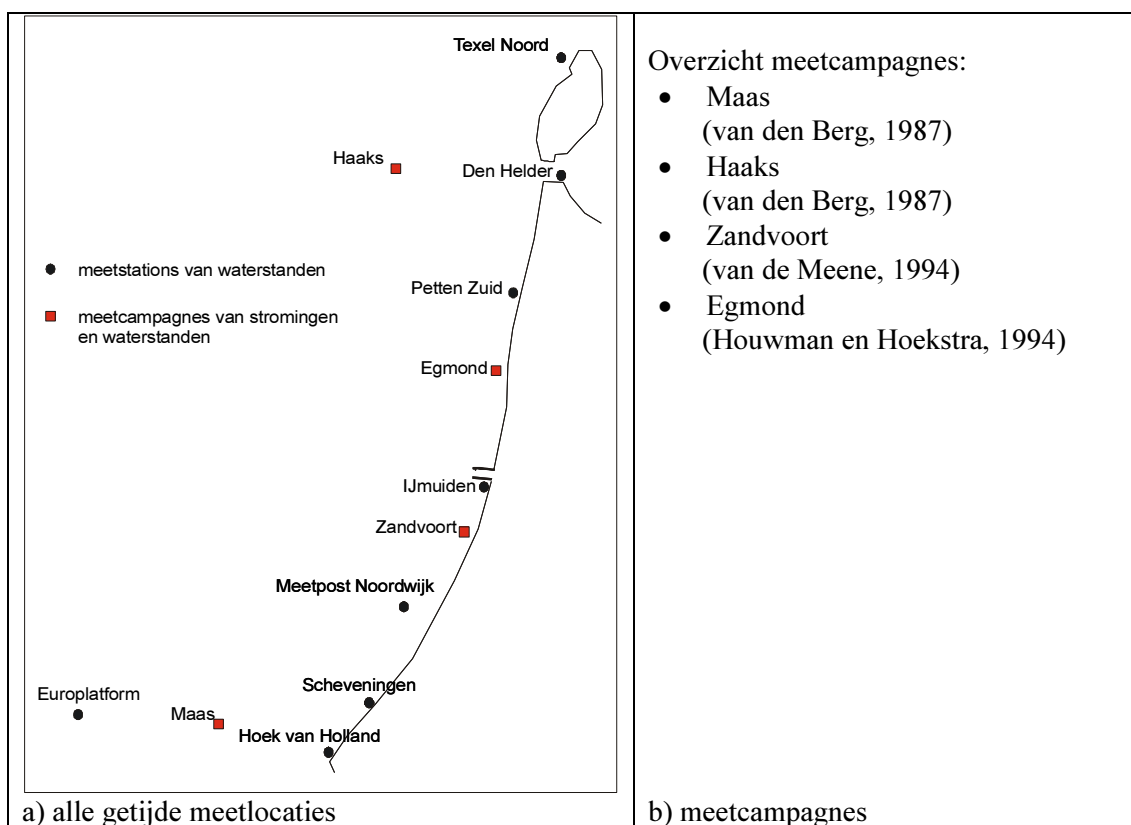
meetstation	10^{-4} extremen van T_{m02}		10^{-4} extremen van T_p	
	waarde	90% betr. interval	waarde	90% betr. interval
SON	11.9	10.9-12.9	19.4	17.2-22.1
ELD	11.6	10.5-12.8	17.1	14.4-20.5
K13	10.9	10.0-12.0	15.8	13.1-19.4
YM6	10.8	10.0-11.7	15.7	13.7-17.9
EUR	9.4	8.8-10.1	13.3	12.5-14.2

 Tabel 4-6: Extreme waarden van T_{m02} en T_p met frequentie 10^{-4} (Roskam, Hoekema, 1996)

5 Getij

5.1 Meetlocaties

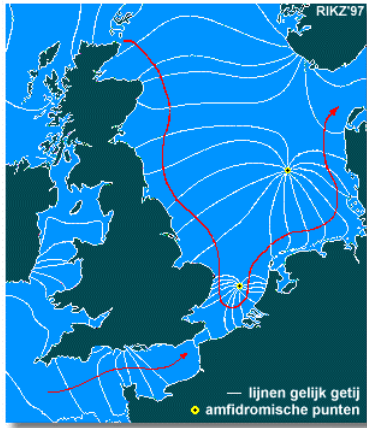
Er zijn veel meetstations langs de Hollandse kust die metingen maken van het getij (Figuur 5-1). Op de meeste stations worden alleen de waterstanden gemeten, maar op een aantal plaatsen zijn meetcampagnes uitgevoerd, waarbij ook stroomsnelheden zijn gemeten (Maas, Zandvoort, Egmond en Haaks). De meeste stations liggen direct aan de kust of in een getijdebekken. Een aantal stations, de zogenaamde offshore stations liggen verder uit de kust. De belangrijkste offshore stations voor de Hollandse kust zijn het Europlatform, Meetpost Noordwijk en Texel Noord.



Figuur 5-1: Getijdestations langs de Hollandse kust

5.2 Uitleg getij

In het algemeen wordt het getij veroorzaakt door aantrekking van de maan en de zon op de water massa's op aarde. Deze krachten zijn in de Noordzee echter onbelangrijk door de beperkte omvang van het Noordzeebekken. De getijbeweging in de Noordzee wordt vooral geforceerd door Atlantische oscillaties bij het Noorden van Schotland. Deze forcering in combinatie met het effect van het draaien van de aarde (Coriolis), resulteert in een staande golf type getijdensysteem, met een zogenaamde Kelvin golf. Door bodemconfiguraties en verschillende vormen van de kust wordt het getij vervormd en kent de Nederlandse kust een ingewikkeld getijdensysteem. Er zijn 3 amphidromische punten (punten zonder getij fluctuaties) in de Noordzee, waar de getijdengolf in feite omheen draait (Figuur 5-2). De positie van deze punten bepalen de getijdenamplitudes in de Noordzee en daardoor ook het getij in de Nederlandse kustwateren. De tak van de getijgolf die het grootste effect heeft op de Nederlandse kust komt de Noordzee binnen tussen Schotland en Noorwegen, waarna deze zich zuidelijk voortplant langs de Britse kusten, en vervolgens wordt omgebogen, zodat de getijgolf langs de Nederlandse kust zich voortplant van zuid naar noord.



Figuur 5-2: Getijbeweging om de amphidromische punten in de Noordzee (www.getij.nl)

Een ander deel van de Atlantische getijgolf nadert het Kanaal vanuit zuidelijke richting, waar deze vervolgens vrijwel geheel geblokkeerd wordt. Hierdoor ontstaat opstuwning van het water aan de zuid-Engelse en Normandische kusten. Nadat de getijgolf zich door het Kanaal heeft geperst zijn de kracht en snelheid aanzienlijk afgenomen.

Uit een simulatie waarbij het Kanaal met een dam is afgesloten volgt dat indien deze afsluiting plaats zal vinden, de amphidromische punten in de Noordzee over tientallen kilometers zouden verplaatsen. Bij Scheveningen zal bijna geen verticaal getij meer op treden, omdat daar een amphidromisch punt zal komen te liggen. Hieruit volgt dat de invloed van deze tak van de getijgolf op het getijdensysteem langs de Nederlandse kust niet onderschat moet worden.

De Hollandse kust is een micro-getijde kust, met een tweemaal daags getij. De voornaamste getijdencomponenten zijn M2, met een frequentie van 28.98 graden/uur, M4, met de dubbele frequentie van M2, en S2 met een frequentie van 30 graden/uur. Het verschil in frequentie tussen de componenten M2 en S2 resulteert in een springtij - doottij cyclus van ongeveer 15 dagen. Door het ontbreken van zeearmen en zeegaten wordt verondersteld dat het getij langs de Hollandse kust een minder belangrijke rol speelt dan bijvoorbeeld bij de Delta -en de Waddenkust. Alleen bij Den Helder is de invloed van het getij op de morfologische processen direct duidelijk merkbaar. Aan de aanwezigheid van de buitendelta ten hoogten van Den Helder is te zien dat het effect van het getij door het getijdenbekken aanzienlijk is. De buitendelta strekt zich uit tot ongeveer 10 km zuidwaarts van Den Helder.

5.3 Voorspelling van het getij

Om voorspellingen van waterstanden ten gevolge van het getij te maken wordt meestal gebruik gemaakt van de harmonische analyse. Het getij wordt hierbij weergegeven als de som van een aantal sinusoiden, waarvan de perioden corresponderen met die van de bewegingen van de zon en de maan. Elke sinusoïde is een harmonische component, die wordt gekenmerkt door een golflengte en een amplitude. Aangezien we de bewegingen van de aarde, de maan en de zon precies weten, kunnen we de belangrijkste componenten van tevoren al precies definiëren. De amplitudes en fasen worden vervolgens met behulp van de kleinste kwadratenmethode afgeleid uit metingen van de waterstand. Aan de hand van de afgeleide componenten kan vervolgens het getij voorspeld worden, met behulp van de volgende benadering:

$$h(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos[\omega_i t + (v_0 + u)_i - G_i] \quad (4.1)$$

waarin: $h(t)$ = waterstand op tijdstip t [cm]
 A_0 = gemiddeld zeeniveau t.o.v. referentieniveau [cm]
 f_i = correctie voor positie knopen (18,6-jarige cyclus) [-]

- H_i = amplitude van component i [cm]
 ω_i = hoeksnelheid van componenten i [graden/uur]
 n = aantal componenten [-]
 $(v_0 + u)_i$ = gecorrigeerd astronomisch argument van componenten i [graden]
 G_i = verbeterd kappagetel van component i [graden]

De amplitudes van de belangrijkste harmonische componenten voor vier locaties langs de Hollandse kust zijn weergegeven in Tabel 5-1. De amplitudes van deze componenten zijn berekend over de periode 1995-1998 en komen uit de getijtafels voor Nederland van 2004. In de laatste kolom staat het gemiddelde percentage van de 4 locaties, van de amplitude van een component ten opzichte van de totale amplitude van alle componenten. De amplitudes van de harmonische componenten in de tabel dragen gemiddeld voor 82.7 % bij aan de amplitudes van alle harmonische componenten. De amplitudes in de laatste rij van de tabel kunnen echter nooit in werkelijkheid voorkomen, omdat de componenten nooit allemaal tegelijk in fase kunnen lopen.

Getijcomponent	amplitude (cm)				gemiddeld percentage van totaal (%)
	Europlatform	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder	
A_0	-	7	2	-1	
M2	74	79	68	65	31.8
S2	18	19	17	18	8.0
M4	10	17	20	11	6.4
N2	12	12	9	10	4.8
Sa	9	8	10	11	4.2
O1	11	11	11	10	4.8
MS4	7	11	12	6	3.9
K1	8	8	8	7	3.4
μ_2	7	8	9	8	3.6
2MN2	6	7	7	6	2.9
K2	5	6	5	5	2.3
MN4	4	6	7	4	2.3
M6	4	5	4	6	2.1
2MS6	4	4	5	6	2.1
totaal	179	201	192	173	82.7
totaal alle comp.	213	242	234	212	100

Tabel 5-1: Amplitudes van de belangrijkste harmonische componenten langs de Hollandse kust, berekend over de periode 1995-1998 (data uit Getijtafels 2004)

De component M2 is de belangrijkste component, gevolgd door S2 en M4. De grootste verschillen tussen de componenten langs de kust zitten in de componenten M2 en M4. De component M4 is de hogere orde component van M2. M4 wordt opgewekt door verschillen in voortplantingssnelheden van de kam en het dal van de getijgolf, waardoor de getijgolf vervormd en de component M4 ontstaat. Bij Den Helder is de totale amplitude van het getij kleiner dan bij Hoek van Holland, wat samenhangt met de ligging van Den Helder, dichtbij één van de amphidromische punten.

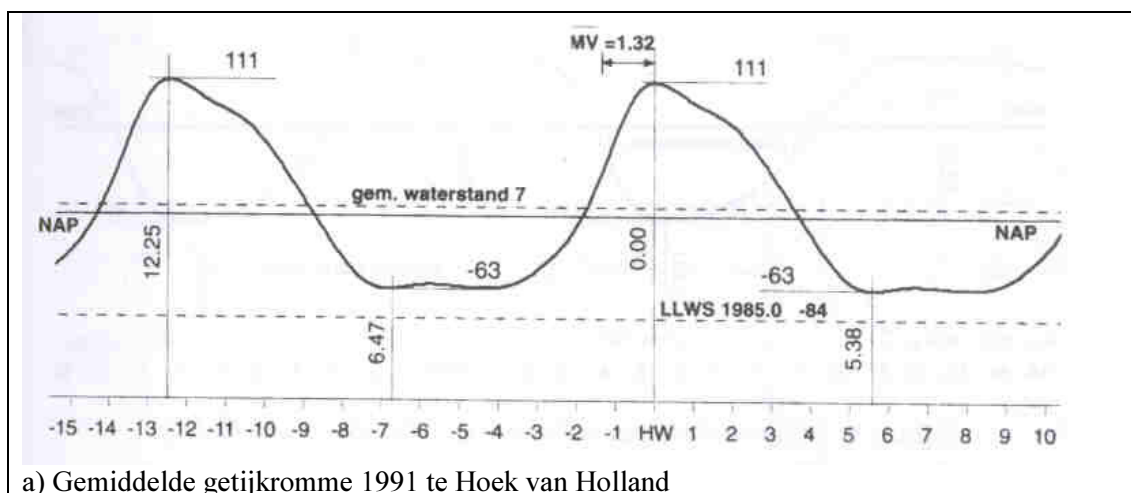
Ook tussen de locatie op open zee (Europlatform) en een locatie aan de kust (Hoek van Holland), die ongeveer op een lijn met gelijk getij liggen, is er een verschil tussen de componenten M2 en M4 waar te nemen. Bij Hoek van Holland zijn de amplitudes van M2 en M4 aanzienlijk groter, waardoor de totale amplitude van alle componenten bij Hoek van Holland groter is. De grotere amplitude aan de kust komt overeen met het karakter van de optredende Kelvin golf, waarbij de amplitude van het getij vanaf het amphidromische punt (verticale amplitude is nul) naar de kust toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door het waterstands verhang als gevolg van het Coriolis effect.

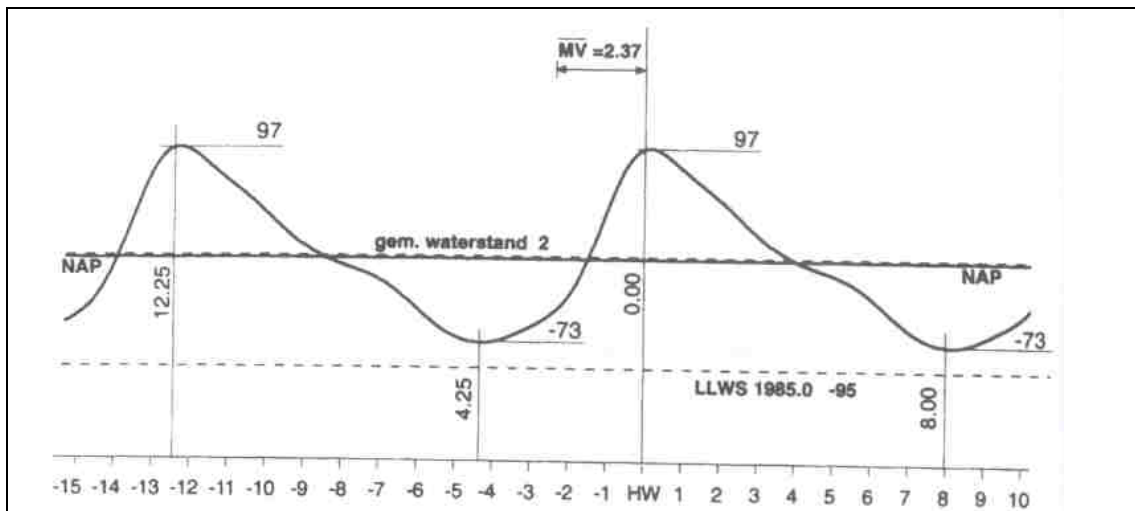
De waterstanden die uit de berekeningen via de harmonische analyse volgen, zullen nooit precies overeenkomen met de werkelijk optredende waterstanden. Deze worden namelijk sterk beïnvloed door een aantal andere factoren, zoals stormvloeden, windrichting, windsterkte en atmosferische druk. Het gemiddelde effect van deze factoren op het gemiddelde zeeniveau wordt weergegeven door de term A_0 . Aangezien A_0 langs de Hollandse kust vrij constant is te noemen en een relatief kleine waarde heeft, zou de benadering via de harmonische analyse, realistische waarde voor de werkelijke optredende waterstanden moeten geven. Er moet dan wel een voldoende lange periode worden beschouwd, zodat het effect van deze factoren op de waterstand van zelf grotendeels wordt uitgedempt.

5.4 Verticaal getij

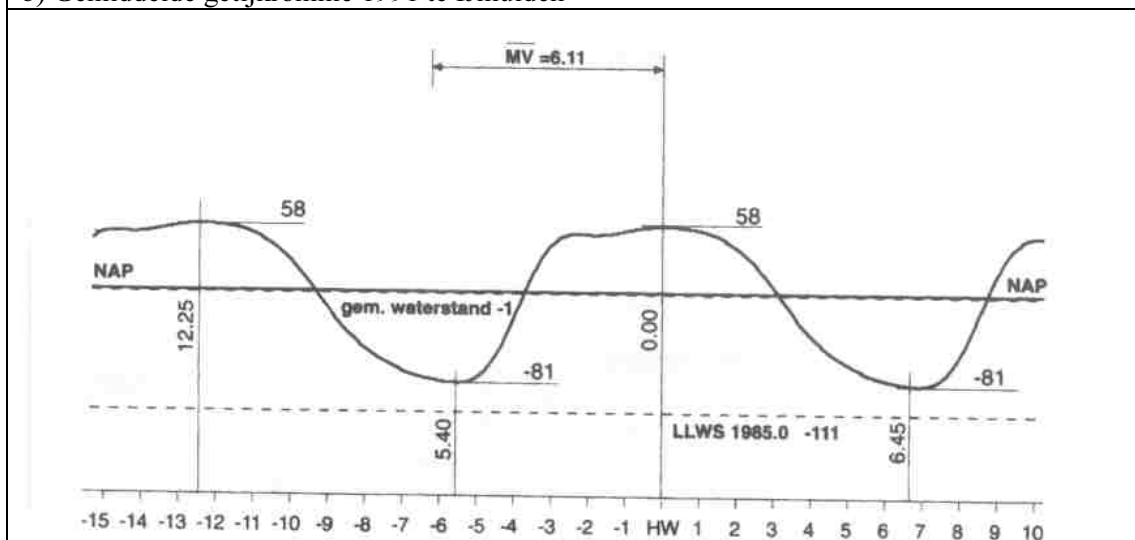
De gemiddelde getijkrommes van het verticale getij bij Hoek van Holland, IJmuiden en Den Helder zijn asymmetrisch (Figuur 5-3). Volgens Speer et al. (1991) kan de asymmetrie in het verticale getij verklaard worden door het effect van het relatieve faseverschil tussen M2 en M4. In Figuur 5-7 is te zien dat de verschillen tussen de amplitudes tijdens hoog en laagwater grotendeels worden veroorzaakt door de relatieve faseverschillen tussen de componenten M2 en M4. Vooral bij Den Helder zijn de componenten M2 en M4 dusdanig uit fase dat de amplitude van de gemiddelde hoog waterstand veel lager is dan die van de gemiddelde laag waterstand. De interactie tussen M2 en M0 kan hier echter ook veel invloed hebben.

De getijslag (hoog waterstand - laag waterstand) langs de Hollandse kust neemt geleidelijk af richting het noorden (zie Figuur 5-4), wat onder andere samenhangt met de ligging van één van de amphidromische punten in de Noordzee. Bij Hoek van Holland en Scheveningen is de gemiddelde getijslag ongeveer 1.75m. Ten hoogte van IJmuiden is deze verminderd tot 1.7m, waarna deze nog verder afneemt tot 1.6m bij Petten en 1.4m bij Den Helder (Getijtafels, 2004). Opvallend is de sterke afname van de getijslag van Petten Zuid naar Den Helder. Opgemerkt moet worden dat het getijdenmeetstation bij Den Helder in de keel van het zeegat ligt en daardoor niet noodzakelijk representatief is voor de waterhoogtes op open zee.



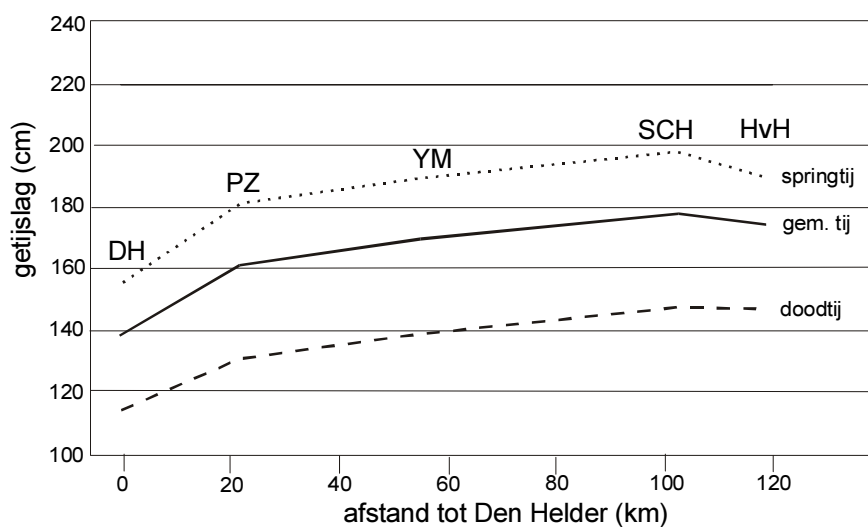


b) Gemiddelde getijkromme 1991 te IJmuiden



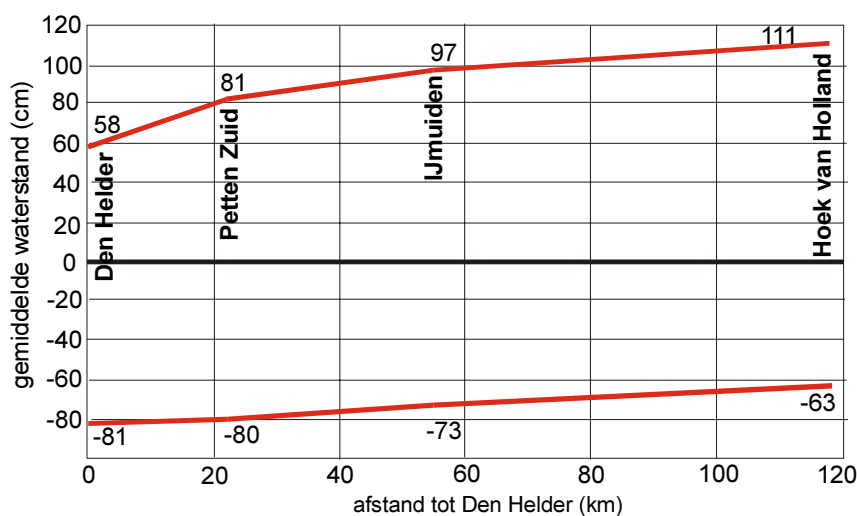
c) Gemiddelde getijkromme 1991 te Den Helder

Figuur 5-3: Gemiddelde getijkrommes van Hoek van Holland (a), IJmuiden (b) en Den Helder (c) (Getijtafels, 2004)



Figuur 5-4: Getijslag langs de Hollandse kust (data uit Getijtafels, 2004)

De stand van het gemiddelde hoog water varieert veel meer langs de kust dan de gemiddelde laag waterstand (Figuur 5-5). Vooral tussen Den Helder en Petten Zuid is er een groot verschil te zien van de gemiddelde hoog waterstanden.



Figuur 5-5: Gemiddeld hoog -en laag water langs de Hollandse kust (data uit Getijtafels, 2004)

Voor de volledigheid zijn in Tabel 5-2 de belangrijkste waarden van het gemiddelde getij, doottij en springtij en de dagelijkse ongelijkheid weergegeven.

	Den Helder	Petten Zuid	IJmuiden	Hoek van Holland
gem. HW	58	81	97	111
gem. LW	-81	-80	-73	-63
gem. getijverschil	139	161	170	174
gem. HW springtij	66	95	115	130
gem. LW springtij	-90	-86	-75	-60
gem. getijverschil springtij	156	181	190	190
gem. HW doottij	49	63	75	88
gem. LW doottij	-66	-68	-64	-60
gem. getijverschil doottij	115	131	139	148
dagelijkse ongelijkheid HW	24		16	16
dagelijkse ongelijkheid LW	8		15	21

Tabel 5-2: Gegevens van het getij langs de Hollandse kust (data uit Getijtafels, 2004), alle waarden zijn in cm en relatief t.o.v. NAP

5.5 Getij asymmetrie

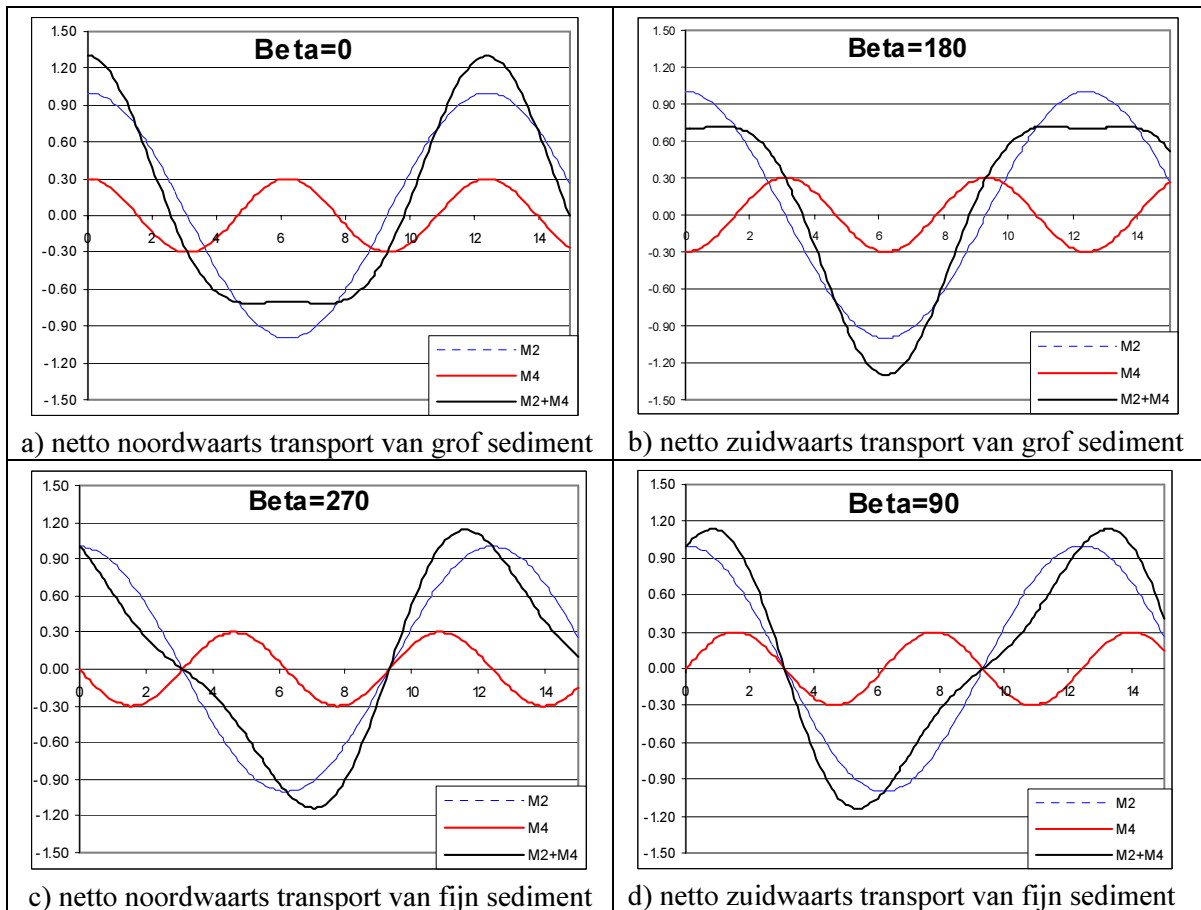
Door de aanwezigheid van hogere orde componenten zijn de uitwijkingen en stromingen door het getij niet geheel sinusvormig, maar bestaat er een asymmetrie tussen vloed en eb uitwijkingen en stromingen. De hogere orde componenten van M2 en andere componenten worden opgewekt door ondiep water effecten, zoals bodemwrijving, vervorming van de getijgolf ten gevolge van het ondiepe water en variaties in diepte en bodemtopografie. De getij asymmetrie wordt vaak veroorzaakt door de interactie van de M2-component met de M4-component; het faseverschil tussen deze twee bepaalt het karakter van de asymmetrie.

De getij asymmetrie ten gevolge van het verschil in fase en amplitude tussen M2 en M4 komt naar voren in Figuur 5-6 en Figuur 5-7. In deze figuren zijn de getij stromingen ten gevolge

van de componenten M2 en M4 weergegeven voor een periode van 15 uur. De getij stroming ten gevolge van de componenten M2+M4 is geschematiseerd door:

$$u(t) = \hat{u}_{M2} \cos(\omega t) + \hat{u}_{M4} \cos(2\omega t - \beta) \quad (4.2)$$

In deze formule zijn \hat{u}_{M2} en \hat{u}_{M4} de amplitudes van de getij stroming, waarvoor waarden zijn genomen van respectievelijk 1 m/s en 0.30 m/s. De hoeksnelheid van M2 is weergegeven door ω (28.984 graden/uur) en β is het relatieve faseverschil tussen M2 en M4. Het relatieve faseverschil tussen M2 en M4 is bepaald door: $\beta = 2 \times \text{fase M2} - \text{fase M4}$.



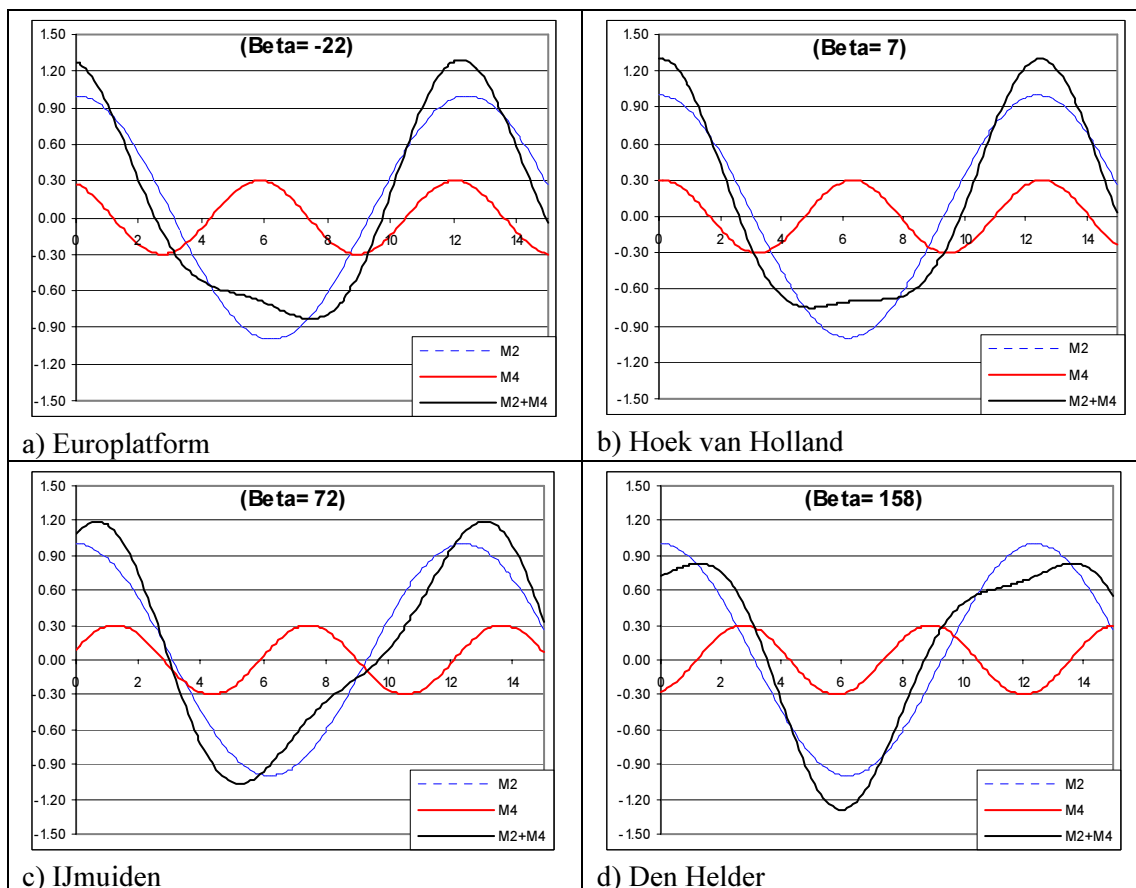
Figuur 5-6: Asymmetrieën in de stroomsnelheden voor een maximaal netto sedimentrapport van grof en fijn sediment (met op de horizontale as de tijd in uren en op de verticale as de getij stroomsnelheid in cm/s)

Het fysische mechanisme voor netto sedimenttransport door getij asymmetrie verschilt substantieel voor grof en fijn sediment. Doordat grof sediment pas bij relatief hoge snelheden wordt getransporteerd en bij lagere stroomsnelheden snel bezinkt, hangt het netto sedimenttransport voornamelijk af van de verschillen tussen de maximale vloed en maximale ebsnelheden. Hierbij wordt aangenomen dat het sedimenttransport evenredig is met een hogere macht van de snelheid ($S \approx \langle u \rangle^n$, met $n=3-5$). Bij het netto transport van fijn sediment zijn de stroomsnelheden minder belangrijk, maar gaat het vooral om de duur van de periode van lage stroomsnelheden rond de kentering. Fijn sediment wordt al bij lage stroomsnelheden getransporteerd en bezinkt langzaam, waardoor alleen bij een langere periode van lage stroomsnelheden bezinking optreedt. Hierdoor is kenteringsduur bepalend voor de hoeveelheid sediment in de waterkolom. Bij bijvoorbeeld een korte kenteringsduur zal zich meer sediment in de waterkolom bevinden dan bij een lange kenteringsduur en dus meer sediment getransporteerd kunnen worden.

Samengevat resulteert de getij asymmetrie voor respectievelijk grof en fijn sediment in de volgende netto sedimenttransport principes voor de Hollandse kust (zie Figuur 5-6):

- *grof sediment*: netto noordwaarts transport als maximale vloedsnelheden groter zijn dan maximale ebsnelheden; maximaal noordwaarts bij $\beta = 0$ graden en maximaal zuidwaarts bij $\beta = 180$ graden;
- *fijn sediment*: netto noordwaarts transport als de periode van lage stroomsnelheden na laag water duidelijk korter is dan na hoog water; maximaal noordwaarts bij $\beta = 270$ graden en maximaal zuidwaarts bij $\beta = 90$ graden;

Onder grof sediment kan in dit geval sediment worden verstaan met korreldiameters van meer dan ca. 100 μm en fijn sediment met een korrel diameter kleiner dan 100 μm , zoals slib. Een eenduidige grens is echter niet goed aan te geven.



Figuur 5-7: Asymmetrie in de getij stromingen door de componenten M2, M4 en M2+M4, met op de horizontale as de tijd in uren en op de verticale as de getij stroomsnelheid in cm/s

In Figuur 5-7 is voor vier verschillende locaties langs de Hollandse kust de asymmetrie in het getij weergegeven t.g.v. de interactie M2-M4. Bij de zuidelijke gelegen stations (Europlatform en Hoek van Holland) veroorzaakt volgens deze benadering, de asymmetrie een netto sedimenttransport van grof sediment noordwaarts en bij Europlatform ook van fijn sediment in noordwaartse richting (zie Tabel 5-3). Bij IJmuiden is het netto effect een transport van grof sediment noordwaarts en fijn sediment zuidwaarts. Ter plaatse van Den Helder lijkt het netto sedimenttransport voor zowel grof als fijn sedimenttransport zuidwaarts te gaan.

Aangezien de interactie tussen M2 en M4 niet de enige oorzaak is voor het ontstaan van getij asymmetrie mogen er niet te voorbarige conclusies uit deze methode worden getrokken. De interactie van M2 met MS4 of M8 kan namelijk ook getij asymmetrie veroorzaken en de

component M6 kan asymmetrie t.g.v. de M2-M4 interactie verstoren en zelfs omkeren (Aldridge, 1997).

Bovendien kan er ook interactie tussen M2 en M0 optreden. De M0-component geeft daarbij de getij gemiddelde stroomsnelheid weer, die kan ontstaan door een intensieve wisselwerking van de getijgolf met de locale topografie. De M0 component ontstaat hierdoor voornamelijk bij vernauwingen en ondiepten, zoals langs de Hollandse kust bij de havendammen van IJmuiden en het Marsdiep estuarium op zou kunnen treden. De interactie tussen M2 en M0 neemt ook toe bij nadering van de kust. Uit berekeningen van Bonekamp et al. (2001) blijkt dat in het Marsdiep de interactie M0 - M2 dominant is over de interactie M2-M4 voor het netto sedimenttransport. Aan de effecten van de getij asymmetrie t.g.v. alleen de M2-M4 interactie moet daarom bij Den Helder weinig waarde aan onttrokken worden.

Aangezien bij de havendammen van IJmuiden ook grote gradiënten in de diepte en stroomrichtingen zijn, zou het effect van de M0-M2 interactie op de getij asymmetrie hier ook wel eens overheersend kunnen zijn.

locatie	rel. faseverschil β	grof sediment	fijn sediment
Europlatform	-22/338	++	+
Hoek van Holland	7	++	+/-
IJmuiden	72	+	--
Den Helder	158	-	-

Tabel 5-3: Effect relatieve faseverschil M2-M4 op netto sedimenttransport van grof en fijn sediment (positief is noordwaarts)

In Tabel 5-4 staan de fases van de belangrijkste harmonische componenten langs de Hollandse kust. Op een soortgelijke manier als hier voorafgaand, kunnen de effecten geanalyseerd worden, van de interactie tussen deze componenten op de asymmetrie van het getij.

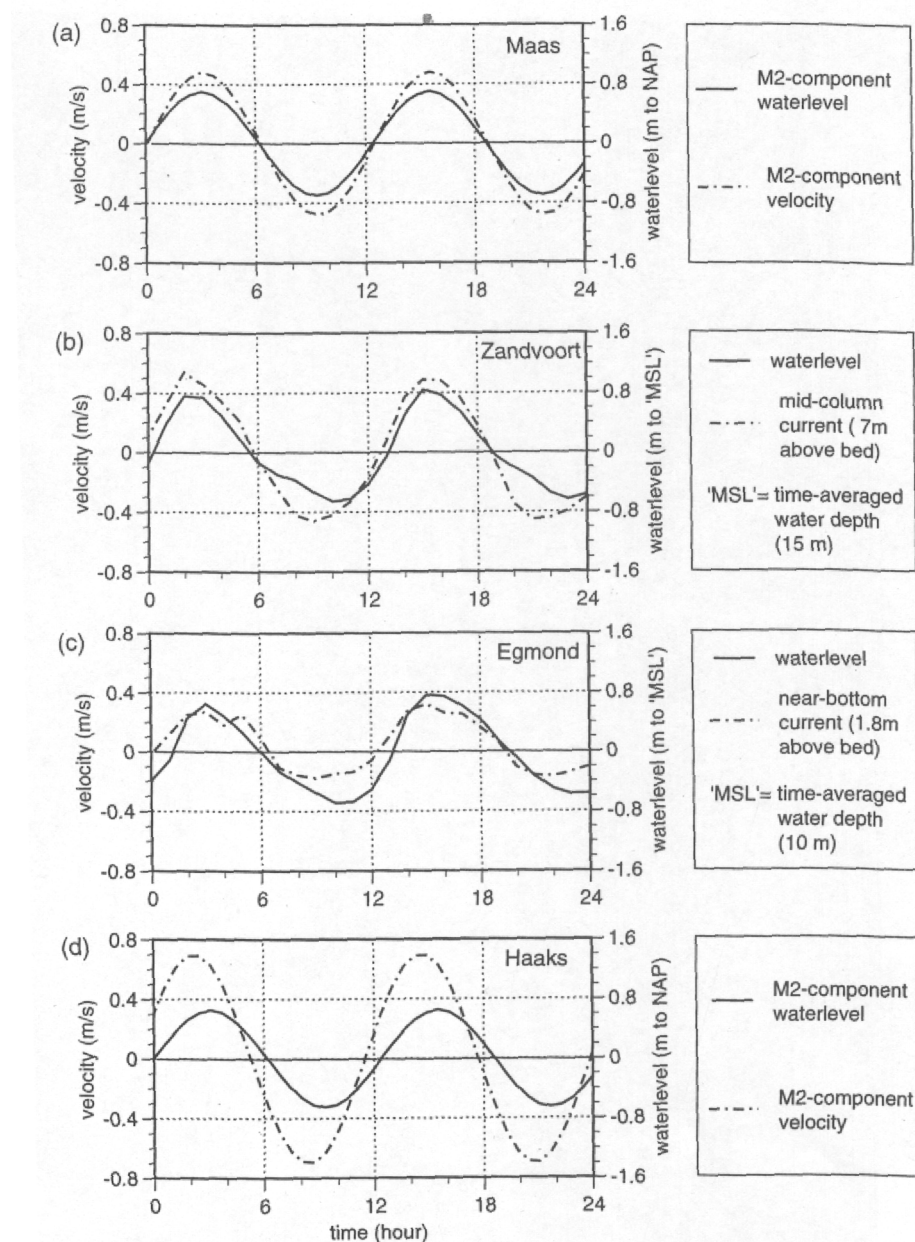
Getijcomponent	fase (graden)			
	Europlatform	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder
β (2M2-M4)	-22	7	72	158
M2	54	86	129	190
S2	110	147	199	259
M4	130	165	186	222
N2	23	56	105	171
Sa	213	222	220	226
O1	192	195	196	207
MS4	185	221	245	285
K1	359	1	359	9
μ 2	178	204	230	276
2MN2	260	289	322	17
K2	113	149	201	259
MN4	105	137	156	193
M6	92	128	291	346
2MS6	146	187	342	40

Tabel 5-4: Fases van de belangrijkste harmonische componenten langs de Hollandse kust, berekend over de periode 1995-1998 (data uit Getijtafels 2004)

Naast de getij asymmetrie zijn ook de faseverschillen tussen het horizontale getij (getij stroming) en het verticale getij (waterniveau uitwijkingen) niet constant langs de kust (Figuur 5-8). Aan de zuidelijke grens van de Hollandse kust (meetstation Maas) zijn het verticale en

horizontale getij bijna in fase en op de noordelijke grens (Haaks) zijn ze 50 graden uit fase. Dit betekent dat het stroomsnelheids signaal gemiddeld $1\frac{3}{4}$ uur achterblijft op het waterniveau signaal. Onderzoeken van oppervlakte uitwijkingen en stroomsnelheden bij Zandvoort (van de Meene, 1994) en Egmond (Houwman en Hoekstra, 1994) laten een faseverschil van 30 graden tussen het verticale en horizontale getij zien. Hierdoor blijkt dat de faseverschuiving langs de kust tamelijk geleidelijk verandert langs de Hollandse kust.

Ook de diepteligging en de afstand uit de kust van de meetstations heeft effect op de getij asymmetrie (Figuur 5-8). Bij de offshore stations zijn de krommes van het getij redelijk symmetrisch, maar bij de stations die direct aan de kust gelegen zijn is de asymmetrie duidelijk groter.



Figuur 5-8: Getij stromingen en waterhoogtes langs de Hollandse kust (Wijnberg, 1995)

5.6 Veranderingen in de tijd

Uit analyse van de waterstandsmetingen in de loop van de tijd door TAW (1995), blijkt dat het verloop van de gemiddelde hoog en laag waterstanden langs de kust verschilt met het verloop van de gemiddelde waterstand (zeespiegelstijging). Dit betekent dat de lokale gemiddelde getijkromme, en dus ook de getijgedreven stromingen, veranderingen hebben ondergaan. Deze veranderingen zullen ongetwijfeld leiden tot geleidelijke morfologische veranderingen. De oorzaken van deze veranderingen in de gemiddelde getijkromme zijn:

- menselijke ingrepen (de invloed van grootschalige waterbouwkundige werken en baggerwerken);
- natuurlijke morfologische veranderingen in het kustgebied (bodempopografie);
- getijveranderingen op de Noordzee (voornamelijk als gevolg van morfologische veranderingen van de zeebodem).

De getijamplitude langs de Nederlandse kust vertoont een stijgende trend. Deze trend vertaalt zich in een verhoging van circa 5 cm voor gemiddeld hoogwater en een verlaging van ongeveer 5cm voor gemiddeld laagwater voor de laatste 100 jaar (RWS, TR6, 1988); beide gerekend voor de gemiddelde waterstand.

Recente studies laten zien dat grootschalige ingrepen in de Waddenzee, geen grootschalige effecten hebben gehad op de getij forcering van de Noordzee en dus ook niet op de Hollandse kust, wat in eerdere studies (Van Malde, 1984) nog werd verondersteld. Ook de zeespiegelstijging blijkt slechts een geringe verandering van de amplitude van het getij te veroorzaken (Bavelaar, 1988).

6 Wind

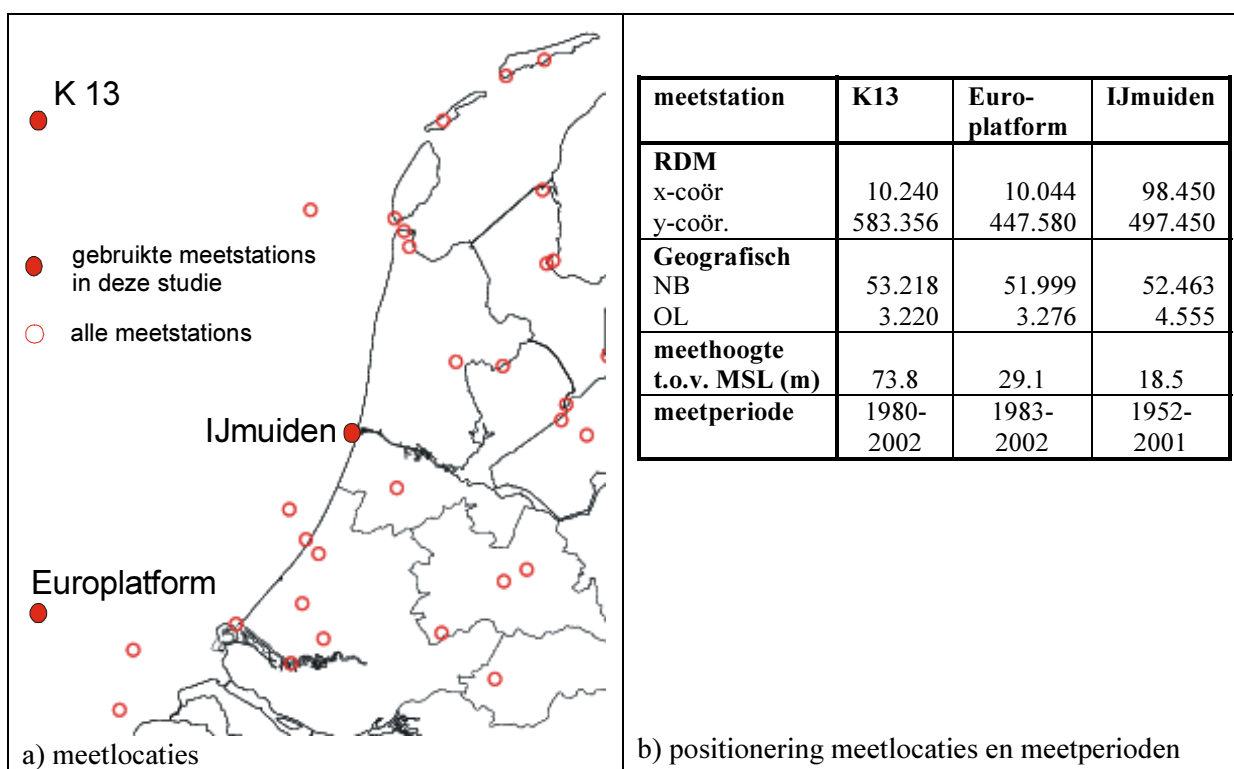
6.1 Inleiding

Wind veroorzaakt waterstands verhogingen (windopzet), golven en extra residuele stromingen in de kustzone. Wind is als zodanig de indirecte oorzaak van veel morfologische veranderingen in het kustgebied, en landwaarts van de momentane waterlijn, een directe oorzaak door de optredende stuifprocessen.

6.2 Meetstations

In Figuur 6-1 is een overzicht te zien van de meetlocaties van het windklimaat die uitgevoerd worden door het KNMI. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de meetstations K13, Europlatform en meetlocatie IJmuiden, zodat er een ruimtelijk beeld van het windklimaat langs de Hollandse kust wordt verkregen. Van deze meetlocaties zijn ook de coördinaten, de meethoogte en de periode waarover gemeten is weergegeven.

De data die gebruikt zijn voor het genereren van het windklimaat, is verkregen van de website: www.knmi.nl/samenw/hydra. Het data interval van de metingen is 1 uur. De windrichting is gemeten in graden ten opzichte van het noorden en met een nauwkeurigheid van 10 graden. De windsnelheden zijn de potentiële windsnelheden op 10 meter boven gemiddeld zeeniveau en in het geval van IJmuiden 10 meter boven open terrein, met een nauwkeurigheid van 0.1 m/s.



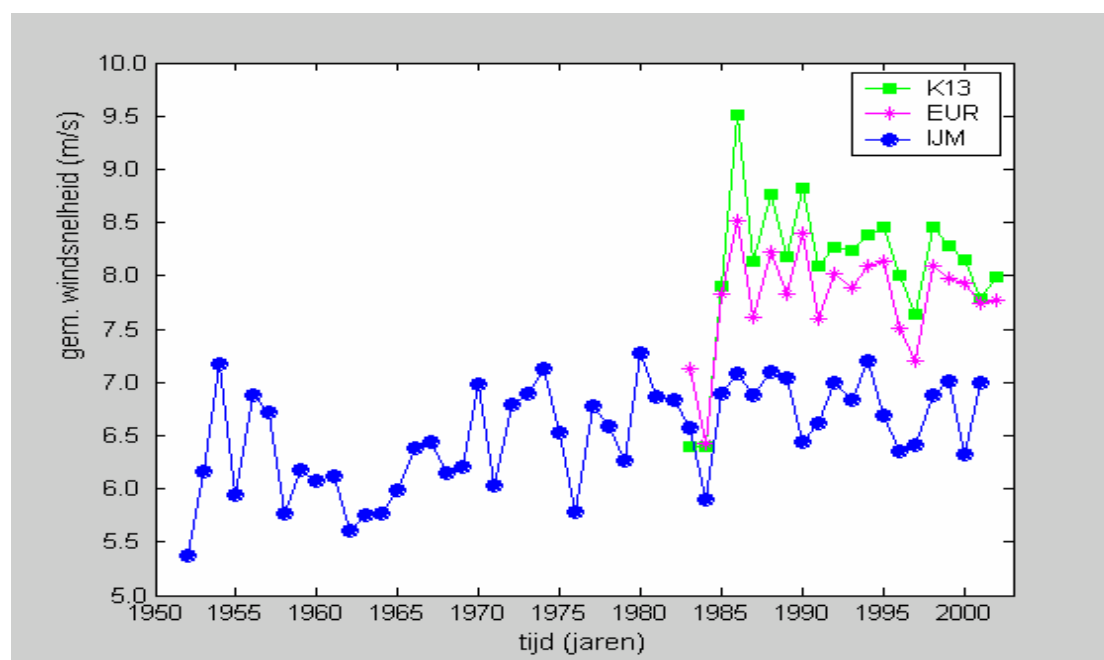
Figuur 6-1: Overzicht meetlocaties windsnelheden -en richtingen

6.3 Karakteristieken windklimaat

6.3.1 Windsnelheden

Een vergelijking van de jaarlijks gemiddelde windsnelheden laat redelijk grote verschillen tussen de verschillende meetlocaties zien (Figuur 6-2). De jaarlijkse gemiddelde windsnelheden over de periode 1983-2001 bij meetstation K13 (8.10 m/s) zijn significant hoger dan die van Europlatform (7.80 m/s) en IJmuiden (6.75 m/s). De hogere waarden bij K13 worden waarschijnlijk veroorzaakt door de ligging van dit stations verder uit de kust. Bij meetpost IJmuiden zijn de gemiddelde windsnelheden veel lager dan bij de andere stations. Hieruit blijkt dat de grotere ruwheid van het landoppervlak veel effect heeft op de windsnelheden.

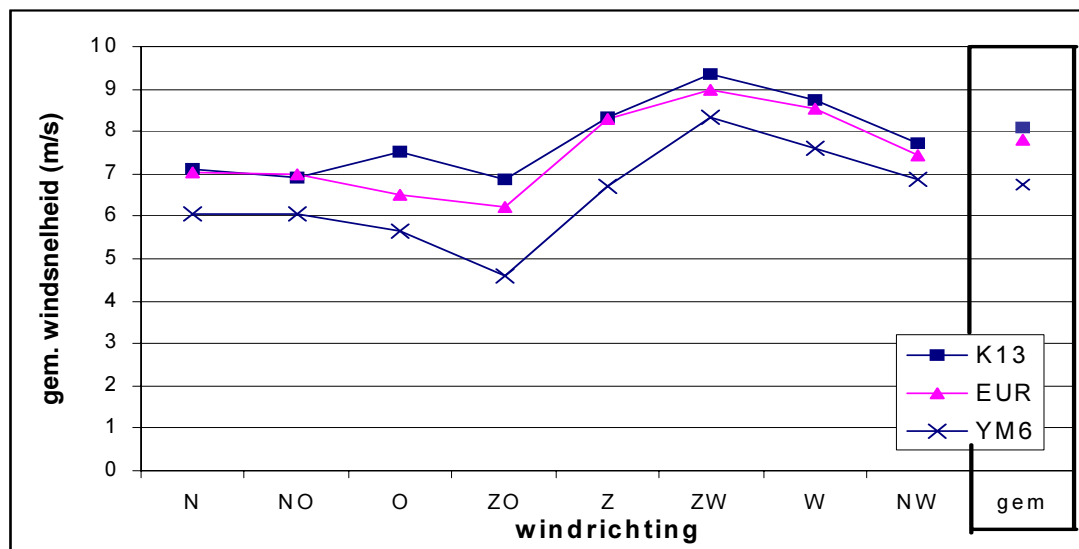
De jaarlijks gemiddelde windsnelheden bij IJmuiden laten een toename van de windsnelheid zien in de tijd, over de periode tot 1980. Door het trekken van een lineaire trendlijn door de meetwaarden van IJmuiden over de periode 1952-1980 blijkt er een toename van ongeveer 0.017 m/s/jr te bestaan. Na 1980 is er geen toename in de windsnelheid, ook niet bij andere meetstations. Er is mogelijk zelf een kleine afname van de gemiddelde windsnelheid in de tijd. De toename van de windsnelheid tot 1980 en de afvlakking in de decennia daarna is in overeenstemming met meetwaarden uit het Europese project WASA (zie paragraaf 5-6).



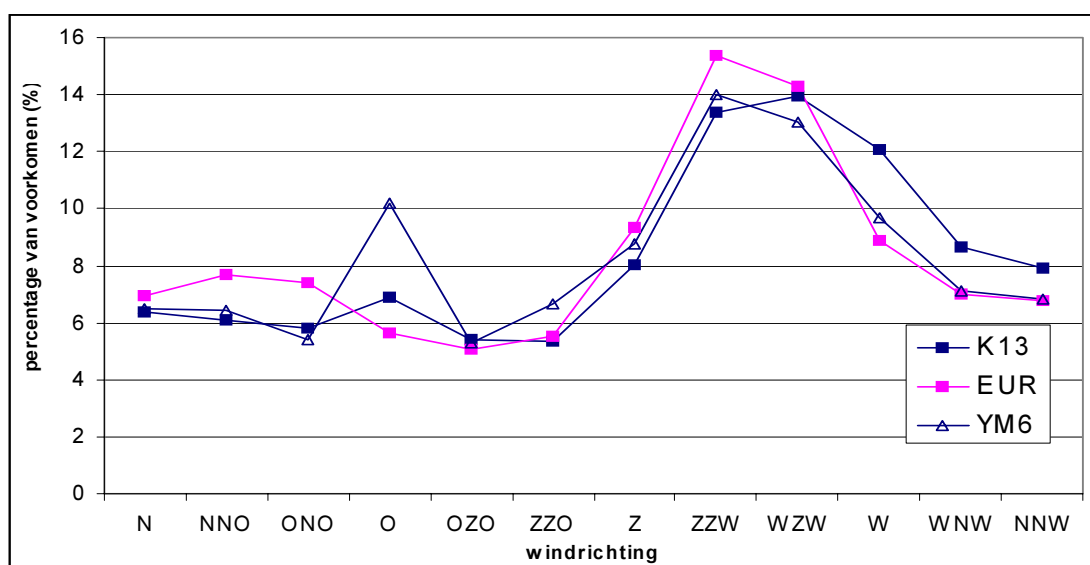
Figuur 6-2: Jaarlijkse gemiddelde windsnelheden (in m/s) van de meetstations K13 (1983-2002), Europlatform (1983-2002) en IJmuiden (1952-2001)

6.3.2 Windrichtingen

De hoogste gemiddelde windsnelheden treden op als de wind uit het zuidwesten komt en de laagste windsnelheden bij wind uit zuidoostelijke richting (Figuur 6-3). De hoge windsnelheden uit zuidwestelijke richting worden vooral veroorzaakt doordat stormen in het Nederlandse kustgebied meestal uit deze richting komen. De lagere windsnelheden voor wind uit zuidoostelijke richting kan verklaard worden door de grotere ruwheidsfactor, die wind uit deze richting ondervindt, door de ligging van het land.



Figuur 6-3: Jaarlijkse gemiddelde windsnelheid (in m/s) per windrichting over de periode 1983-2001

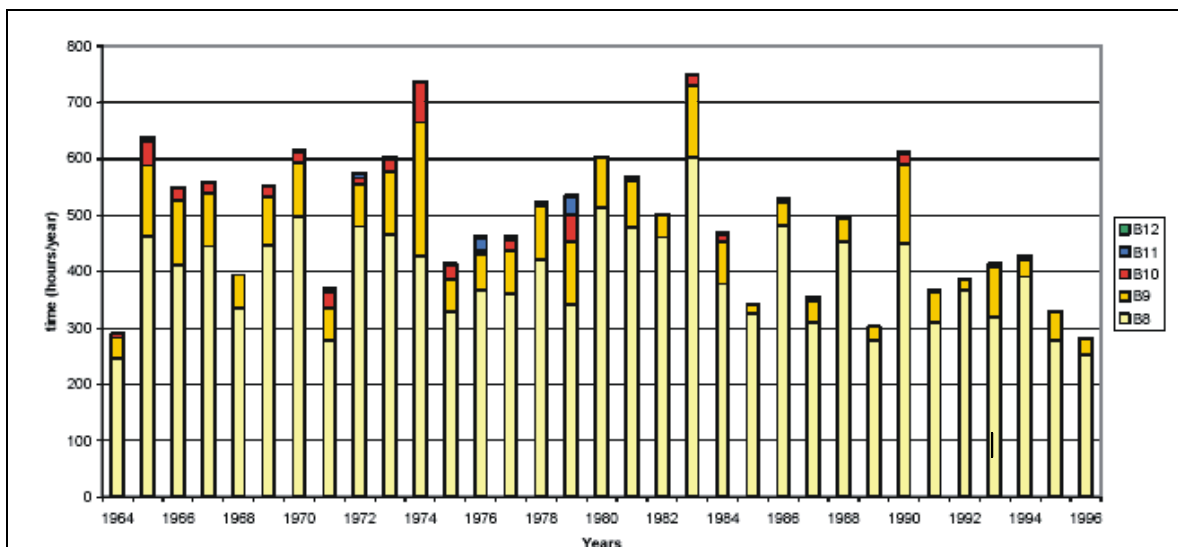


Figuur 6-4: Percentage van voorkomen van wind per windrichting over de periode 1983-2001

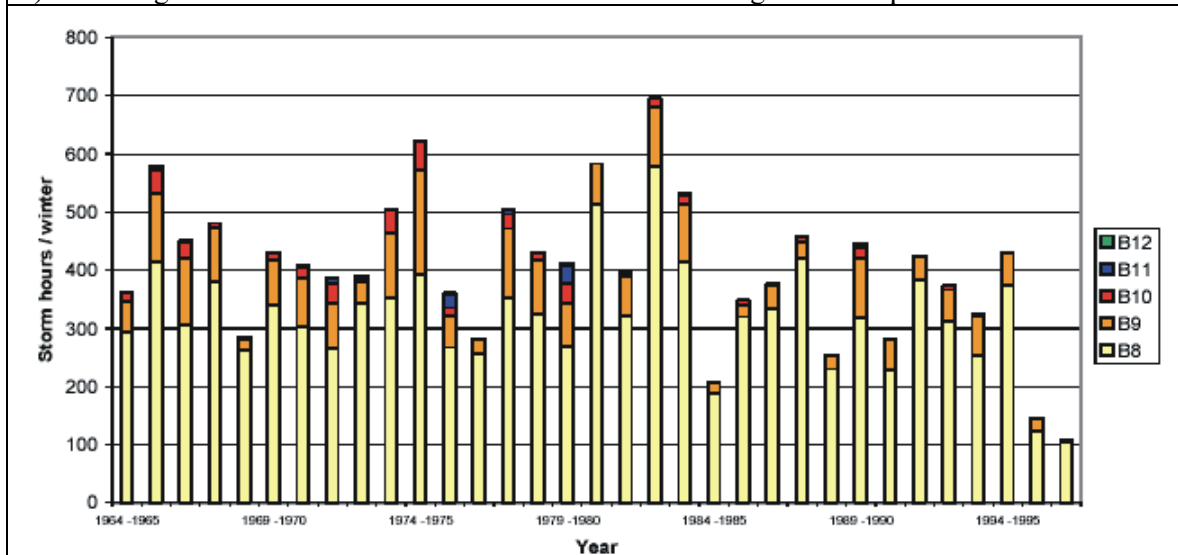
Gedurende de meeste tijd van het jaar komt de wind uit de richting ZZW of WZW (Figuur 6-4). Bij IJmuiden is een piek te zien voor wind uit oostelijke richting, waar echter geen duidelijke verklaring voor is te geven.

6.4 Stormen

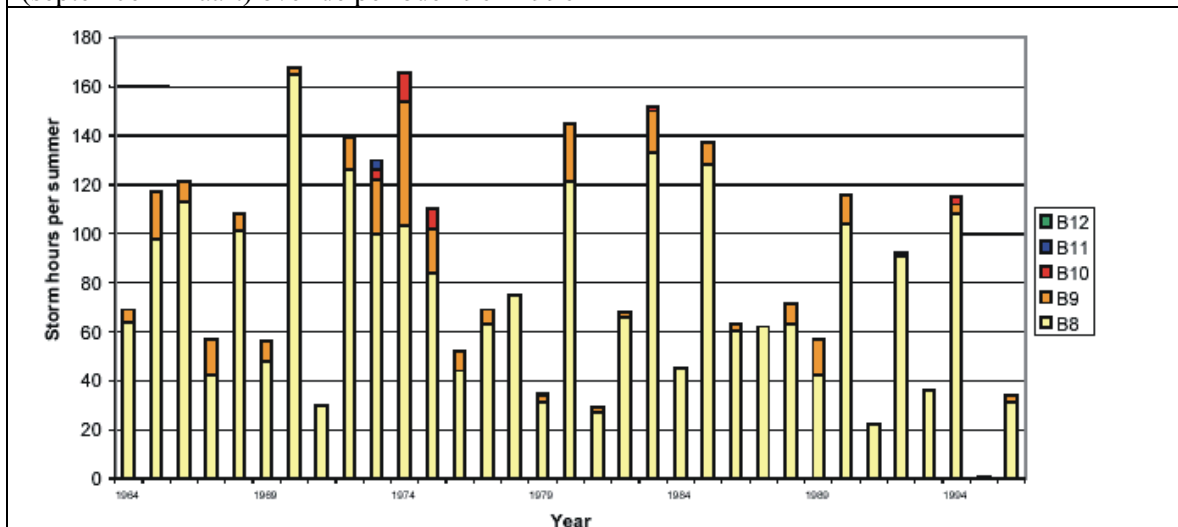
Bij analysering van de transporten langs de Hollandse kust over een korte tijdschaal (uren tot jaren) is niet alleen het gemiddelde windklimaat van belang, maar ook het stormklimaat. In het werk van Augustijn (1990) wordt een storm gedefinieerd als de periode waarin de windkracht ten minste 8 Beaufort is. In de stormenkalender van Augustijn (1990) en Augustijn en Zwart (1997) zijn de stormdata van de periode van 1964-1996 gepubliceerd. De grafische weergave van deze stormdata is weergegeven in Figuur 6-5. In deze figuur is per jaar de totale duur van alle stormen weergegeven met een windkracht van minstens 8 Beaufort.



a) Verdeling van de duur van stormen met windkracht 8 en hoger over de periode 1964-1996



b) Verdeling van de duur van stormen met windkracht 8 en hoger gedurende de winter (september - maart) over de periode 1964-1996



c) Verdeling van de duur van stormen met windkracht 8 en hoger gedurende de zomer (april - augustus) over de periode 1964-1996

Figuur 6-5: Stormduur verdeling over het periode 1964-1996 (van Baak, 2002)

In deze analyse worden in de eerste plaats de totale stormduur per jaar geanalyseerd in plaats van het aantal stormen per jaar, omdat deze meer van belang is voor de transporten langs de kust. De gemiddelde duur dat het stormt in een jaar over de periode 1964-1996 is ongeveer 500 uur/jaar, waarvan 90 uur gedurende de zomerperiode en 410 uur gedurende de winterperiode. De jaarlijkse variatie van het aantal stormen is erg groot, van 13 in 1989 tot 48 in 1970. Het aantal stormen in de zomerperiode varieerde in aantal van 0 tot 10 en in de winter van 10 tot 43. Gemiddeld komen er elk jaar 35 stormen voor, waarvan gemiddeld 5 tijdens de periode april - augustus, "de zomerperiode" (1x per maand). In de "winter periode" van september tot maart is de gemiddelde frequentie van stormen 5x per maand. In de winter gaat de koude lucht over relatief warm water, waardoor snel een instabiele situatie ontstaat, waardoor stormen kunnen ontstaan. In de zomer is het temperatuur verschil tussen de lucht en het water een stuk kleiner waardoor minder snel een instabiele situatie ontstaat en minder stormen optreden.

Ook de variatie in stormduur is groot, van 1-50 uur voor een zomerstorm en van enkele uren tot 96 uur voor een winterstorm. Over het algemeen is de duur van een zomerstorm (9 uur), korter dan een winterstorm (15 uur). November, december en januari zijn over het algemeen de meest stormachtige maanden en de periode van april tot augustus zijn rustige maanden. Februari, maart, september en oktober zijn overgangperiode.

De meeste stormen komen uit de richtingen zuidwest en west en in mindere mate uit de richtingen noordwest en zuid (Tabel 6-1). De zwaardere stormen met een windkracht van 10 Beaufort en meer, komen echter vaker uit westelijke richting. Gedurende de zomerperiode komen de stormen relatief vaker uit zuidwestelijke richting dan gedurende de winterperiode.

	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW
alle stormen	9	2	5	2	13	32	23	14
zomer	10	3	1	0	6	44	18	18
winter	5	2	6	2	15	32	25	13
zware stormen	7	2	0	0	4	22	45	20

Tabel 6-1: Percentage van voorkomen per windrichting voor verschillende stormtypes over de periode 1964-1990 (Augustijn, 1990)

6.5 Wind set-up

Wind dat over het wateroppervlak waait zorgt door de veroorzaakte wrijvingskrachten voor een waterstandverhang, wat zowel een set-up als een set-down van de waterstand kan zijn. De grootte van de waterstandverandering is afhankelijk van de windsnelheid (in het kwadraat), de waterdiepte en de strijklengte. Daardoor treedt een groot waterstandverhang vooral op tijdens stormomstandigheden.

De grootste windopzet langs de Nederlandse kust treedt op bij noordwesten wind, door de grote strijklengte, en kan onder extreme omstandigheden enkele meters bedragen. Het effect van kust parallelle stormen op de waterstand hangt af van de benaderingsrichting. Door het Coriolis-effect geven stormen vanuit het zuiden en zuidwesten set-up van de waterstanden langs de Hollandse kust en stormen vanuit het noorden en noordoosten set-down. Door de trechtervorm van het Noordzeebekken resulteert sterke wind vaak in grootschalige stromingspatronen.

6.6 Veranderingen in de tijd

Tijdseries van jaarlijks gemiddelde windkarakteristieken over de periode 1907-1980 van offshore windstations zijn geanalyseerd door Hoozemans (1989;1990). In deze periode blijkt het windklimaat enigszins verandert te zijn. De jaarlijks gemiddelde windrichting uit het

zuidwesten is een aantal graden opgeschoven richting het noorden. De jaarlijkse gemiddelde windsnelheid is toegenomen met ongeveer 1 m/s en de frequentie van voorkomen van landwaartse wind is met enkele procenten afgenomen. Deze toename van de windsnelheid komt goed overeen met de metingen van meetpost IJmuiden waar een toename van de windsnelheid van 0.017 m/s/jr uit volgde (paragraaf 5.3.1).

In het Europese project WASA is het golf -en windklimaat van de afgelopen eeuw uitvoerig geanalyseerd. Hieruit is gebleken dat op de tijdschaal van decennia het golf -en windklimaat significante variaties heeft ondergaan, die de laatste decennia zijn toegenomen. De intensiteit van het huidige storm -en golfklimaat is echter te vergelijken met die van het begin van de vorige eeuw, maar is groter dan in de periode 1940-1980. Er is een kleine toename in de laatste decennia van de kans op hogere windsnelheden en hogere golven.

6.7 Modelling van wind

Meestal wordt er bij het modelleren van de wind één representatieve windsnelheid en richting genomen die het gehele windveld moet weergeven. Voor de windsnelheid wordt dan een waarde genomen van 7 m/s en voor de richting 240 graden t.o.v. het noorden. Om de validiteit van dit representatieve windveld te testen is in de studie van Roelvink et al. (2001) en in de deze studie het windklimaat nogmaals geanalyseerd.

Elke uurlijkse observatie van windsnelheid en windrichting is getransformeerd naar een noordelijke en oostelijke component van wind stress met behulp van de volgende formules:

$$\tau_n^w = -c_d \rho_a w |w| \cos(\theta) \quad [\text{N/m}^2] \quad (5.1)$$

$$\tau_o^w = -c_d \rho_a w |w| \sin(\theta) \quad [\text{N/m}^2] \quad (5.2)$$

waarin ρ_a is de dichtheid van lucht (= 1,25 kg/m³), w is de windsnelheid en θ de windrichting in graden t.o.v. het noorden en c_d de drag-coëfficiënt. De drag-coëfficiënt is uitgerekend met (Smith en Banke, 1975):

$$c_d = 0.00063 + 0.000066w \quad [-] \quad (5.3)$$

Er wordt verondersteld dat in de studie van Roelvink et al. ook met deze drag-coëfficiënt is gerekend, al staat er een ander formulering in deze studie weergegeven.

Het "-" teken is aan de formule toegevoegd om ervoor te zorgen dat wind uit het zuiden en westen een (positieve) stroming veroorzaakt in respectievelijk noordelijke en oostelijke richting. De waarden van de verschillende stations die uit de berekening van Roelvink volgden, zijn weergegeven in Tabel 6-2 en van deze studie in Tabel 6-3.

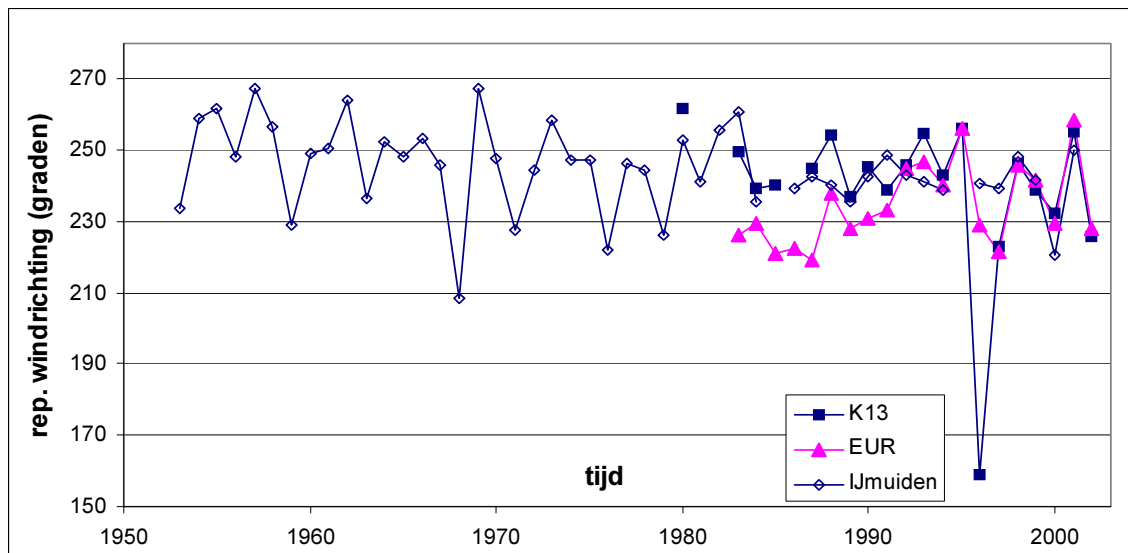
meetstation	gem. τ_n^w [N/m ²]	gem. τ_o^w [N/m ²]	gem. τ^w [N/m ²]	windsnelheid [m/s]	windrichting [graden t.o.v.N]
Noordwijk	0.018	0.048	0.051	6.3	250
K13	0.022	0.045	0.050	6.3	244
Goeree	0.016	0.040	0.043	5.9	248
IJmuiden	0.012	0.029	0.032	5.2	247
Eurolplatform	0.026	0.039	0.047	6.1	236

Tabel 6-2: Lange termijn representatieve windkarakteristieken (Roelvink et al., 2001)

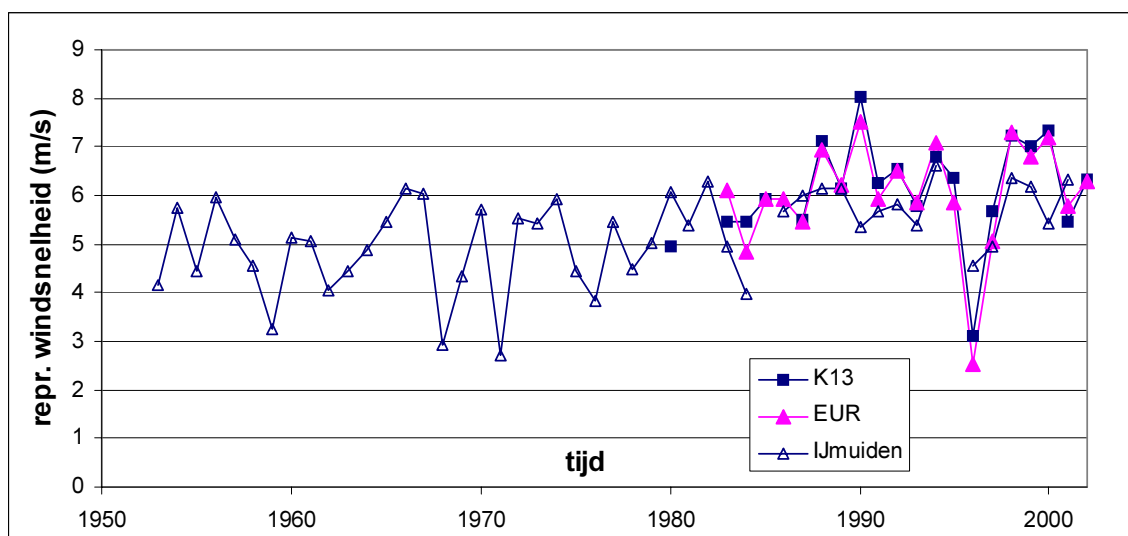
meetstation	gem. τ_n^w [N/m ²]	gem. τ_o^w [N/m ²]	gem. τ^w [N/m ²]	windsnelheid (w) [m/s]	windrichting (θ) [graden t.o.v.N]
K13	0.022	0.045	0.050	6.25	243
Eurolplatform	0.027	0.040	0.048	6.14	236
IJmuiden	0.019	0.035	0.040	5.66	242

Tabel 6-3: Representatieve windkarakteristieken over de periode 1983-2001

De verschillen tussen beide berekeningen blijken heel klein te zijn. Alleen bij IJmuiden blijken er aanzienlijke verschillen tussen beide berekeningen van de windstress te zijn, 0.032 N/m² t.o.v. 0.040 N/m². Dit verschil is ontstaan doordat bij Roelvink et al. voor meetstation IJmuiden de periode van 1953-1999 is beschouwd en in deze studie de periode van 1983 tot 2001. Aangezien de laatste jaren de windsnelheden zijn toegenomen is de waarden van 0.040 N/m² realistischer voor het huidige windklimaat bij IJmuiden.



Figuur 6-6: Representatieve windrichting t.o.v. de tijd, die volgt uit de omzetting van het windklimaat naar wind stress



Figuur 6-7: Representatieve windsnelheid t.o.v. de tijd, die volgt uit de omzetting van het windklimaat naar wind stress

De representatieve waarden van de windsnelheden en windrichtingen per jaar zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 6-6 en Figuur 6-7. Typerende waarden van het jaarlijkse gemiddelde windveld die uit deze berekening volgen zijn een windsnelheid van 6-6.5 m/s en een windrichting van ongeveer 240 graden t.o.v. het noorden. Deze waarden komen goed overeen met de waarden van 7 m/s en 240 graden, al is de windsnelheid van 7 m/s aan de hoge kant. De jaar-tot-jaar variabiliteit van de representatieve windsnelheid is ongeveer 2 m/s. Het jaar 1990 was een erg winderig jaar en 1996 was een erg kalm jaar. Bij meetstation K13 is de representatieve windsnelheid het grootste, overeenkomstig met de

jaarlijkse gemiddelde windsnelheid, die hier ook groter dan bij de andere stations is. De waarden van IJmuiden liggen beneden de waarden van de andere stations. De jaarlijkse variabiliteit van de windrichting is ongeveer 30 graden, met kleine verschillen tussen de verschillende meetlocaties.

6.8 Droog zandtransport door wind

Op het strand en in de duinen is wind een belangrijke oorzaak van zandtransport. Voor deze zogenaamde stuifprocessen is voornamelijk het locale windveld van belang, welke echter veel kan afwijken van het algemene windveld. Zandtransport ten gevolge van de wind is sterk afhankelijk is van de windsterkte (Tabel 6-4). Daarbij speelt in de duinen ook de topografie een rol, omdat die van invloed is op het locale windveld. Bij de toppen van de duinregels is de locale windrichting veelal (bijna) loodrecht op de oriëntatie van de duinregels, ook wanneer de wind op het strand schuin ten opzichte van de duinregels invalt (Adriani, Terwindt, 1974). De zandopname door de wind hangt mede af van de eigenschappen van het bodemmateriaal. Kittende bestanddelen, zoals slibdeeltjes, zoutkorsten en kalk -of ijzerverbindingen, bemoeilijken zandopname. In de duinen komt verstuiving vooral voor op plaatsen waar schoon, humusloos zand aan de oppervlakte ligt. In de duinen is op de meeste plaatsen begroeiing geplant, zoals helmgras, om verstuiving van het zand te verminderen.

windkracht (Beaufort)	windsnelheid (circa) (m/s)	zandtransport (10^{-6} m ³ /s/m)
3	4.5	-
4	7.0	1
5	10.0	3
6	12.5	14
7	15.5	31
8	19.5	86
9	22.5	165
10	26.5	310
11	31.0	408

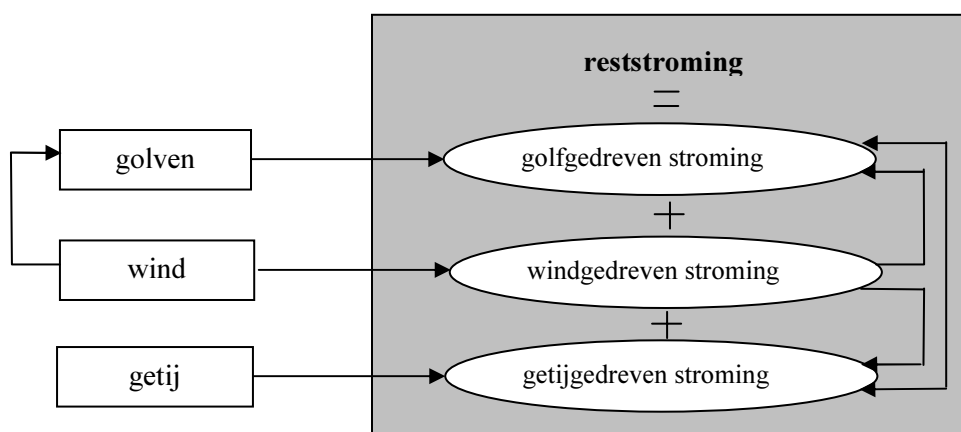
Tabel 6-4: Relatie tussen windkracht, windsnelheid en zandtransport als gevolg van stuifprocessen (Adriani & Terwindt, 1974)

7 Stromingen

7.1 Inleiding

Zandtransporten treden op als gevolg van de gezamenlijke werking van golven, wind en getij. Golven woelen daarbij het zand los van de bodem, waarna het kan worden getransporteerd door een combinatie van golven, wind en getij. De wind zorgt voor de opwekking van golven en voor de zogenaamde windgedreven stromingen. De opgewekte golven zorgen voor stromingen in de brekerzone in twee richtingen. Een stroming parallel aan de kust ten gevolge van breking en een stromingscirculatie in dwarsrichting. Deze stromingscirculatie ontstaat doordat een overmaat aan water naar de kust wordt getransporteerd met de brekende golven, waardoor een waterstandverhoging ontstaat, die vervolgens gecompenseerd wordt door een stroming in zeewaartse richting, de undertow.

De werking van de golven, wind en getij zijn echter niet strikt van elkaar te scheiden, omdat deze elkaar in sterke mate beïnvloeden (zie Figuur 7-1). Het is daardoor ingewikkeld om de afzonderlijke invloeden op de resulterende stroming te bepalen. Over de interactie tussen wind, golven en getij bestaan nog veel onzekerheden, maar het is duidelijk dat dit een niet te onderschatten factor is voor de resulterende stroming in het de kustzone.



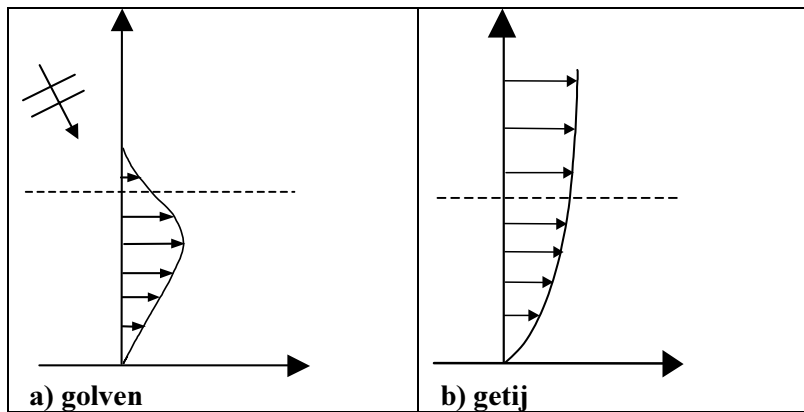
Figuur 7-1: Schematisatie van relaties tussen verschillende stromingen

In het algemeen kan worden gesteld dat de invloed van het getij richting de kust afneemt en de invloed van de golven richting de kust juist toeneemt (Figuur 7-2). Hierdoor ontstaan in feite 3 zones:

- de buitenzone: getij-gedomineerd;
- de midden-zone: gedomineerd door golven en getijgedreven stromingen;
- de binnenzone: golf-gedomineerd.

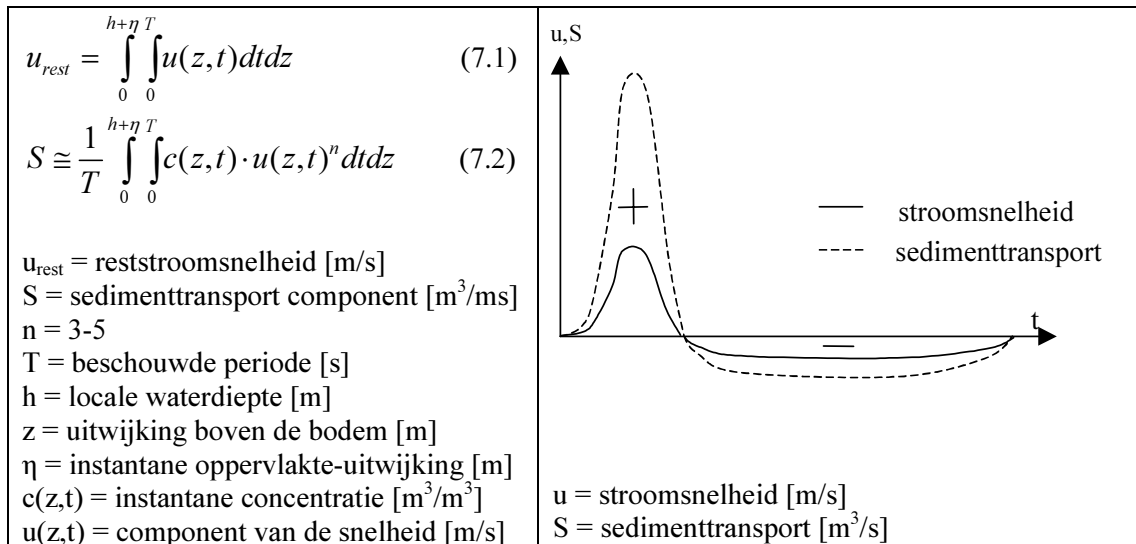
Bovendien wordt er verondersteld dat de wind in alle 3 de gebieden ook een belangrijke stromingsbepalende factor speelt.

Het is echter niet mogelijk de begrenzings van iedere zone eenduidig vast te stellen. De transporten in de binnenzone (brekerzone) zijn over het algemeen groter dan in de dieper gelegen zones. Dit wordt veroorzaakt door de turbulente werking van de golven, waardoor de concentratie van het sediment in de waterkolom veel groter is dan op dieper water. Bij eenzelfde stroomsnelheid wordt daardoor op ondiep water meer sediment getransporteerd dan op dieper water. Op dieper water is echter het stroomvoerende diepte groter, waardoor ondanks de lage concentraties het transport aanzienlijk kan zijn.



Figuur 7-2: Stromingsprofielen van golven en getij (de gestippelde lijn is de brekerlijn)

Indien de stroomsnelheden in "positieve" richting groter zijn dan in "negatieve" richting betekend echter niet automatisch dat de reststroming ook in positieve richting is. De reststroming wordt namelijk bepaald door de stroomsnelheid geïntegreerd over de tijd (en de diepte). Indien bijvoorbeeld de maximale positieve stroming heel groot is, maar over een korte termijn optreedt, is de kans groot dat de reststroming toch in negatieve richting is (zie Figuur 7-3). Vervolgens hangt het netto transport weer af van de stroomsnelheid tot de macht 3-5, waardoor een grote piek in de stroomsnelheid in positieve richting en een reststroomsnelheid die negatief gericht is, toch tot een sedimenttransport in positieve richting kan leiden. Voorwaarde voor sedimenttransport is echter wel dat de waterbeweging sterk genoeg moet zijn om het sediment van de bodem te tillen of te laten rollen. Het punt van begin van beweging wordt aangegeven door de kritische snelheid, die bij zandige kusten zoals de Hollandse kust circa 0.25 m/s is.



Figuur 7-3: Reststroming en sedimenttransport principe

Dit hoofdstuk gaat verder niet in op de transporten in het kustgebied, maar is vooral gericht op de stromingen ten gevolge van de golven, de wind, en het getij en gaat verder nog in op stromingen ten gevolge van dichtheidsverschillen door uitstroming van rivierwater in de zee.

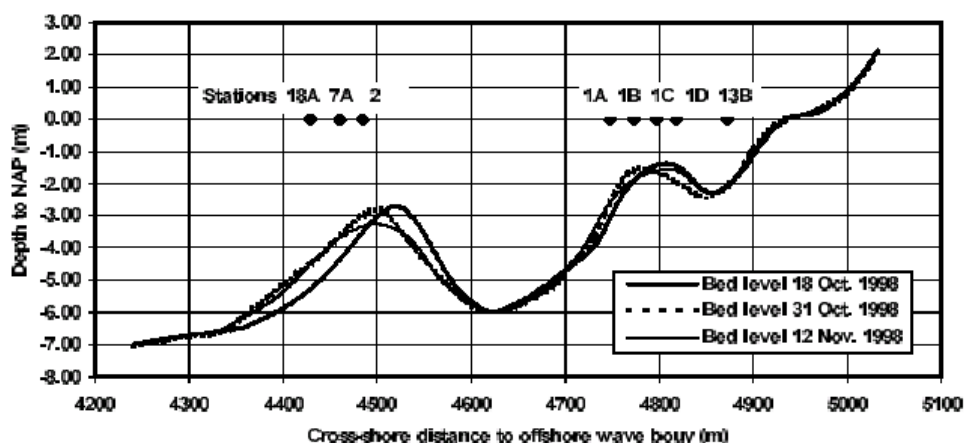
7.2 Golf-gerelateerde stromingen

7.2.1 Stroming in langsrichting

De stroomsnelheid in langsrichting (evenwijdig aan de kust) is afhankelijk van:

- de golfhoogte: bij toenemende golfhoogte neemt zowel de mate van opwoeling, als de sterkte van de golfgedreven stroming toe;
- verloop bodemdiepte / bodemtopografie zeewaarts: aangezien de golfhoogte ontwikkeling sterk afhankelijk is van de bodemtopografie van de kust is de golfgedreven stroming ook indirect afhankelijk hiervan. Indien er veel zandbanken en/of ondieptes voor de kust aanwezig zijn, zal de golfgedreven stroming in de brandingszone aanzienlijk kleiner zijn;
- hoekverdraaiingen van de kustlijn of van de hoek van golfval in langsrichting; In beide gevallen verandert de hoek die de inkomende golven met de kust maken. Indien deze invalshoek dichterbij 45 graden komt, neemt de sterkte van de golfgedreven stroming toe;

Als golven onder een hoek de kust naderen wordt onder invloed van een gradiënt in radiation stress een stroming evenwijdig aan de kust aangedreven. Deze gradiënt ontstaat door het breken van golven en deze golfgedreven stroming vindt daarom alleen plaats in de brekerzone in dieptes van minder dan circa 6 meter (golven langs de Hollandse kust worden nooit hoger dan ca. 10m). De maximale diepte-gemiddelde stroomsnelheid is ongeveer 2 m/s, maar is over het algemeen minder dan 1 m/s (Roelvink et al., 2001).



Figuur 7-4: Locatie van meetstations Egmond gedurende experimenten (COAST 3D, van Rijn, 2002)

In het project COAST 3D (Van Rijn, 2002) is bij Egmond over een periode van een maand (okt. - nov. 1998) een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd, op een aantal plaatsen loodrecht op de kust (zie Figuur 7-4). De belangrijkste conclusies wat betreft golfgedreven stromingen waren:

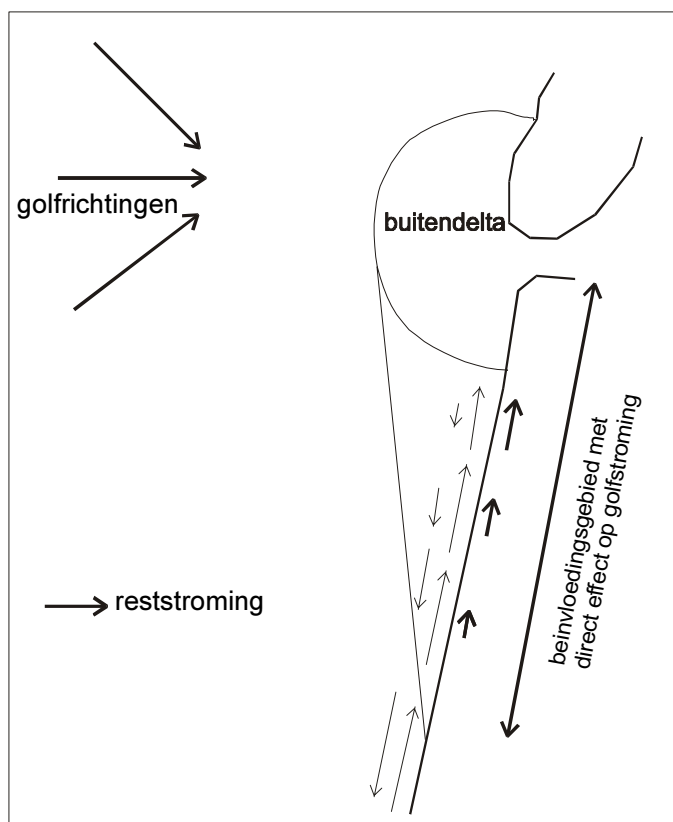
- Golven vanuit het noordwesten vergroten zuidwaarts gerichte stromingen, er is echter geen significante vermindering van noordwaartse stroming waar te nemen;
- Wind/golf gedreven stromingen bij de binnenste brekerbank zijn over het algemeen tussen de 0.5 en 0.8 m/s voor offshore golfhoogtes tot 3m (vanuit het zuidwesten) en maximaal tot 1.3 m/s voor golfhoogtes van meer dan 3 meter;
- Wind/golf gedreven langstroming bij de buitenste brekerbank (ongeveer 450 m uit de kust) is over het algemeen tussen de 0.6 en 1.2 m/s voor offshore golfhoogtes tot 3m (vanuit het zuidwesten) en maximaal tot 2 m/s voor golfhoogtes van meer dan 3 meter bij een storm met windsnelheden van 20 m/s uit het zuidwesten);
- getijde stromingen overheersen tijdens lage golfcondities ($H_s < 1\text{m}$);

- de cross-shore snelheden zijn gering t.o.v. de longshore (factor 2-3) snelheden.

Aangezien de voorgaande meetdata alleen bij Egmond zijn gemaakt, is het vooral de vraag hoe de spreiding van de golfenergie langs de rest van de kust is en hoe het daarmee samenhangende stroombeeld eruit ziet. Uit berekeningen van het verloop van de golfhoogte op de -8m dieptelijn langs de Hollandse kust bij verschillende golfrichtingen (Roelvink et al., 2001) kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Invloed van afscherpende werking van buitendelta op de golfhoogte loopt tot ongeveer 20 km ten zuiden van Den Helder;
- De havendammen van IJmuiden hebben invloed op de golfhoogte over een afstand van ca. 5 km aan weerszijden van de havendammen, het effect is echter duidelijk kleiner dan bij Hoek van Holland en bij Den Helder;
- De havendammen van Hoek van Holland zorgen over een afstand van ca. 20 km voor een vermindering van de significante golfhoogte bij een golfrichting van 210 graden t.o.v. het noorden. Bij een invalshoek van 270 is de afstand nog ongeveer 10 km.

In paragraaf 3.5.2 kwam naar voren dat de invloed van de buitendelta op de golfhoogte tot ongeveer de Pettemer Polder (km 20) waarneembaar is, overeenkomstig met bovenstaande berekening van Roelvink et al. De invloed van de buitendelta op de golfrichtingen is mogelijk nog verder naar het zuiden merkbaar, tot ongeveer km 25. Door de aanwezigheid van de buitendelta komen de golven vroegtijdig in relatief ondiep water, waardoor de golven veel diffractie ondervinden en onder een kleine hoek de kust naderen. Door deze kleine hoek van golfinval is de golfgedreven stroming vooral voor golven uit het de richtingen noordwest tot noord gering. De golfgedreven stromingen nemen bij golven uit het zuidwesten echter in mindere mate af, waardoor een netto golfgedreven stroming ontstaat in het gebied van km 25 tot Den Helder (km 0), die naar het noorden steeds groter wordt (Figuur 7-5). De bovenstaande hypothese zal echter nog getoetst moeten worden, door middel van golfberekeningen en/of metingen van de stroomsnelheden.



Figuur 7-5: Effect buitendelta op golfgedreven stromingen

De hoek van golfval is een van de belangrijkste factoren die de grote van de golfgedreven stromingen in langsrichting bepaald. Om een indicatie te krijgen van de richting van de netto golfgedreven stroming wordt gekeken naar de hoek van golfval bij verschillende golfhoogte klassen en kustlijnoriëntatie.

Noordwaarts golfgedreven stromingen treden voornamelijk op bij golven uit de richtingen WZW en ZZW, maar in het zuiden van de Hollandse kust ook bij golven uit het westen, door de grotere kustlijnoriëntatie. Zuidwaarts golfgedreven stromingen treden vooral op bij de golfrichtingen NNW en in mindere mate bij WNW voor de noordelijke gelegen secties en N voor de zuidelijk gelegen secties. Hierbij worden de effecten van diffractie en refractie buiten beschouwing gelaten.

Het percentage van voorkomen van golven in de golfhoogte klasse $1.5 < H_{m0} < 3.5$ wordt verondersteld netto het meeste de golfgedreven stromingen te bepalen, omdat golven in deze klasse relatief vaak voorkomen (Tabel 7-1) en hoog genoeg zijn om een significante stroming te veroorzaken.

H_{m0}	Percentage van voorkomen	N	NNW	WNW	W	WZW	ZZW
alle	100	14.2	17.9	10.4	9.5	16.8	12.7
< 1.0m	44.8	7.8	7.8	4.4	3.8	5.5	4.1
1.0 - 1.5	23.4	3.8	4.1	2.2	1.9	3.5	3.3
1.5 - 3.5	29.4	2.5	5.3	3.4	3.3	7.1	5.2
3.5 - 4.5	1.9	0.1	0.5	0.4	0.4	0.0	0.1
> 4.5	0.5	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0

Tabel 7-1: Percentage van voorkomen van golven per golfrichting en golfhoogte klasse bij IJmuiden

Hieruit volgend kan de Hollandse kust onderverdeeld worden in de volgende kustsecties met bijbehorende golfgedreven stroming:

- Den Helder - Petten (km 0-25): gedomineerd door noordwaarts gerichte stroming die richting Den Helder toeneemt, door afscherming van golven door de buitendelta en diffractie van golven uit de richtingen N en NW;
- Petten - IJmuiden (km 25-50): de frequentie van voorkomen van golven (uit de klasse $1.5 < H_{m0} < 3.5$) met de richting WZW en ZZW is groter dan de frequentie uit de richting NNW en WNW (Tabel 7-1). Netto wordt er daarom in deze sectie een noordwaarts gerichte golfgedreven stroming verwacht;
- Havendammen IJmuiden (km 50-60): direct ten noorden (km 50-55) van de havendammen stroming naar het zuiden en direct ten zuiden (km 55-60) stroming naar het noorden;
- IJmuiden - Scheveningen (km 60-100): De frequentie van golven die zuidwaarts gerichte stroming veroorzaken (uit de klasse $1.5 < H_{m0} < 3.5$) is kleiner dan de frequentie van golven die noordwaarts gerichte stroming veroorzaken. Netto is er daardoor een noordwaarts gerichte stroming;
- Scheveningen - Hoek van Holland (km 100-118): zuidwaarts gerichte stroming door afschermende effect havendammen Hoek van Holland.

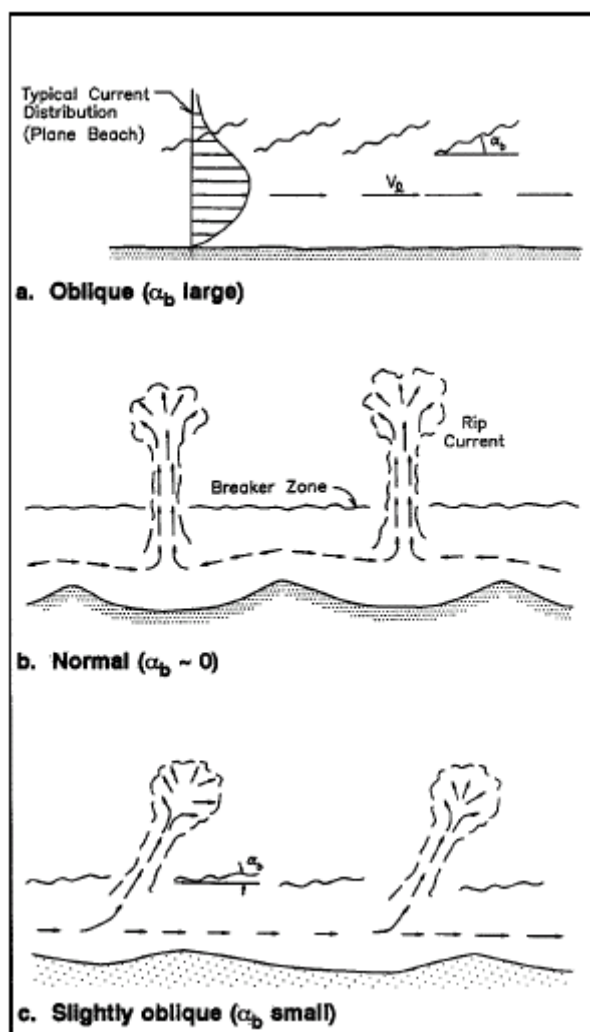
7.2.2 Stroming in dwarsrichting

De stroomsnelheid in dwarsrichting (loodrecht op de kust) wordt langs de Hollandse door de volgende golfgedreven processen gedomineerd (van Rijn, 1995):

- netto kustwaarts gerichte stroming is dominant door golfasymmetrie in niet-brekende golfcondities (buiten de brekerzone, "diep" water);

- netto zeewaarts gerichte stroming is dominant door golfasymmetrie in brekende golfcondities (binnen de brekerzone, "ondiep" water). Dit de zogenaamde "undertow";
- netto kustwaarts gerichte stroming door de opwekking Longuet-Higgins stromings-effect in de golf grenslaag;
- zeewaarts gerichte stroming door gebonden lange golf effecten;
- muistroming, die kan ontstaan als golven loodrecht op de kust invallen (Figuur 7-6 (b)), deze dwarsstroming is kleinschalig, de effecten zijn echter vaak groot;
- Interactie tussen korte en lange golven.

Er bestaat echter ook een circulatie die zowel stroming in langs als in dwarsrichting veroorzaakt (zie Figuur 7-6 (c)). Deze circulatie kan optreden indien de inkomende golven een kleine hoek t.o.v. de kust hebben.



Figuur 7-6: Horizontale circulatie patronen als functie van de hoek van golfinval

Uit de metingen bij Egmond (COAST 3D, van Rijn, 2002) kwamen de volgende conclusies voor cross-shore stromingen:

- zeewaarts gerichte stromingen bij de buitenste bank zijn bijna nul gedurende lage golfcondities ($H_s < 0$) en maximaal (0.4 m/s) zeewaarts bij stormcondities (golfhoogte van 3m en meer)
- de grootste cross-shore stromingen (0.65 m/s zeewaarts) zijn gemeten tijdens stormcondities met golfhoogte van 4.5 m;

- cross-shore stromingen tijdens stormcondities varieerde bij de inner bar tussen de 0.2 en 0.5 m/s door de variaties in de waterhoogte door het getij;

7.3 Getij-gerelateerde stromingen

Door de verplaatsing van een getijgolf ontstaan de getijgedreven stromingen, die voortdurend van grootte en richting veranderen. Lokaal kunnen deze veranderingen worden veroorzaakt door faseverschillen, vervormingen van de getijgolf door bodemtopografie, de aanwezigheid van zeearmen, zeegaten en waterbouwkundige kunstwerken, de invloed van wind, of in de nabijheid van riviermondingen door dichtheidsverschillen van het water.

De getij gedreven stromingen langs de Hollandse kust zijn min of meer parallel aan de kust gericht. Deze stromingen hebben een maximale snelheid van 0.7 m/s op diep water tijdens vloed (naar het noorden) gedurende springtij en de ebstromingen (naar het zuiden) hebben een maximale snelheid van 0.6 m/s. De gemiddelde vloodsnelheid is ongeveer 0.6 m/s naar het noorden en de gemiddelde ebstroomsnelheid is ongeveer 0.5 m/s naar het zuiden. Dit resulteert in een rest stromingssnelheid van 0.1 m/s naar het noorden.

afstand tot Den Helder(km)	waterdiepte (m)	langsrichting				dwarsrichting			
		max. vloed (m/s)		max. eb (m/s)		max. vloed (m/s)		max. eb (m/s)	
		geen wind	wind	geen wind	wind	geen wind	wind	geen wind	wind
14 (Callantsoog)	20	0.65	0.81	-0.50	-0.30	-0.055	-0.073	0.037	-0.006
	8	0.52	0.63	-0.40	-0.09	-0.012	-0.014	0.013	-0.004
40 (Egmond)	20	0.64	0.77	-0.53	-0.40	0.170	0.230	-0.130	-0.080
	8	0.56	0.69	-0.44	-0.20	0.023	0.024	-0.020	-0.022
76 (Noordwijk)	20	0.65	0.75	-0.56	-0.44	-0.010	0.003	0.015	0.05
	8	0.54	0.66	-0.42	-0.17	0.040	0.030	-0.010	-0.006
103 (Scheveningen)	20	0.66	0.76	-0.55	-0.44	-0.008	0.003	0.030	0.030
	8	0.54	0.65	-0.39	-0.18	-0.010	-0.014	0.030	0.020

(+ noord, kustwaarts; - zuid, zeewaarts)

Tabel 7-2: Maximale diepte gemiddelde stroomsnelheden met (ZW, 15 m/s) en zonder wind in langs en dwarsrichting volgens het TRIWAQ-model (Rijkswaterstaat, 1993)

Uit berekeningen van Rijkswaterstaat (1993) met het TRIWAQ-model kunnen de volgende conclusies getrokken worden (voor de raaien op km 14, 40, 76 en 103):

- de maximale vloedstromingen zijn altijd groter dan de ebstromingen;
- de maximale snelheid in langsrichting op een diepte van 20m is ongeveer 0.65 m/s (zonder wind) gedurende vloed en ongeveer 0.5-0.55 m/s gedurende eb; de netto stroomsnelheid is het grootste bij Callantsoog (km 14) met 0.15 m/s t.o.v. 0.1 m/s bij de andere stations;
- de maximale snelheid in langsrichting op een diepte van 8m is ongeveer 0.5-0.55 m/s (zonder wind) gedurende vloed en ongeveer 0.4-0.45 m/s gedurende eb; de netto stroomsnelheid is vrij constant langs de kust, ongeveer 0.1 m/s;
- de maximale kustwaarts gerichte stromingen ten gevolge van het getij zijn over het algemeen groter dan de maximale zeewaarts gerichte stromingen;
- de maximale kustwaarts en zeewaarts gerichte stromingen op 20m diepte zijn grootste bij Egmond, respectievelijk 0.17 m/s en 0.13 m/s; de snelheden in de ander stations zijn 0.01 tot 0.05 m/s;

- de maximale kustwaarts en zeewaarts gerichte stromingen op 8m diepte zijn ongeveer 0.01 m/s tot 0.05 m/s; de kustwaarts gerichte stromingen zijn het grootste bij Scheveningen;

Vergelijking van de berekende stroomsnelheden in langsricting met meetwaarden komen goed overeen bij Noordwijk, maar onderschatten de waarden bij Egmond (Tabel 7-3).

station	diepte	stroomsnelheid in langsricting [m/s]	
		gemeten	berekend
Noordwijk (Groenendijk, 1994)	20	$U_{\max, \text{vloed}} = 0.7$ $U_{\max, \text{eb}} = 0.6$ (laag springtij)	0.60 0.55
Zandvoort (v.d. Meene, 1994)	18	$U_{\max, \text{vloed}} = 0.7$ $U_{\max, \text{eb}} = 0.6$ (laag springtij)	- -
Egmond (Houwman, 1993)	9	$U_{\max, \text{vloed}} = 0.6$ $U_{\max, \text{eb}} = 0.4$ (hoog dootij)	0.55 0.45

Tabel 7-3: Vergelijking gemeten en berekende maximale getijde snelheden in de stations Noordwijk, Zandvoort en Egmond

Indien er een zuidwesten wind van 15 m/s langs de kust waait heeft dat de volgende invloeden op de getij snelheden volgens de berekeningen met TRIWAQ (Rijkswaterstaat, 1993):

- zuidwesten wind van 15 m/s vergroot de maximale stroomsnelheid tijdens vloed op 20m diepte tot 0.8 m/s en vermindert de maximale eb snelheid tot ongeveer 0.3 m/s bij Callantsoog en tot 0.45 m/s bij Scheveningen; de netto stroomsnelheid is het grootste bij Callantsoog met 0.5 m/s en het kleinste bij Scheveningen met 0.3 m/s;
- zuidwesten wind van 15 m/s vergroot de maximale stroomsnelheid tijdens vloed op 8m diepte tot 0.65 m/s en vermindert de maximale eb snelheid tot ongeveer 0.1 m/s bij Callantsoog en tot 0.2 m/s bij Scheveningen; de netto stroomsnelheid is vrij constant langs de kust met ongeveer 0.45-0.50 m/s;
- zuidwesten wind van 15 m/s vergroot de maximale kustwaarts gerichte stroomsnelheden op 20m diepte tot 0.25 m/s bij Scheveningen en vermindert de zeewaarts gerichte snelheid tot 0.07 m/s; de snelheden in de andere stations zijn klein (0.01-0.05 m/s);
- zuidwesten wind van 15 m/s heeft nauwelijks invloed op de kustwaarts en zeewaarts gerichte stroming op 8m diepte;

locatie	diepte t.o.v. NAP (m) (18 okt.)	maximale stroming in langsricting door getij		maximale stroming in langsricting door getij, wind en golven	
		vloed (m/s)	eb (m/s)	vloed + golven vanuit ZW (m/s)	eb + golven vanuit NW (m/s)
2, zeevaartse flank buitenste bank	-3.5	0.5	-0.35	2	-1.1
1A, zeevaartse flank binnenste bank	-3	0.35	-0.25	1	-0.75
1B, zeevaartse flank binnenste bank	-1.7	0.35	-0.25	1.1	-0.9
1C, kam binnenste bank	-1.6	0.3	-0.2	1.2	-1.15
1D, landvaartse flank binnenste bank	-1.9	0.3	-0.2	1.3	-1.15
13B, landvaartse dal binnenste bank	-2.5	0.4	-0.35	1.1	-1.1

Tabel 7-4: Maximale stroomsnelheden in langsricting door het getij, wind en golfgedreven processen (COAST 3D, van Rijn, 2002)

Bij de meetcampagne bij Egmond zijn de volgende getij gedreven stroomsnelheden gevonden (Tabel 7-4), waarbij opgemerkt moet worden dat de maximale diepte waar gemeten is circa 5.5 m is (Van Rijn, 2002):

- De maximale getijde stroomsnelheden in langsrichting varieert van 0.3 tot 0.5 m/s (tijdens kalm weer, met golven tot ongeveer 1m);
- Stormen vanuit het zuidwesten vergroten de maximale vloednelheden naar het noorden tot waarden van 2 m/s en verminderen de ebsnelheden naar het zuiden;
- Stormen vanuit het noordwesten veroorzaken een maximale stroomsnelheid van 1.2 m/s naar het zuiden;
- Maximale getijde stroomsnelheid in langsrichting tijdens vloed (eb) worden met een factor 3 tot 4 vergroot door de wind en golfgedreven processen gedurende stormcondities uit het zuidwesten c.q. noordwesten;

7.4 Wind-gerelateerde stromingen

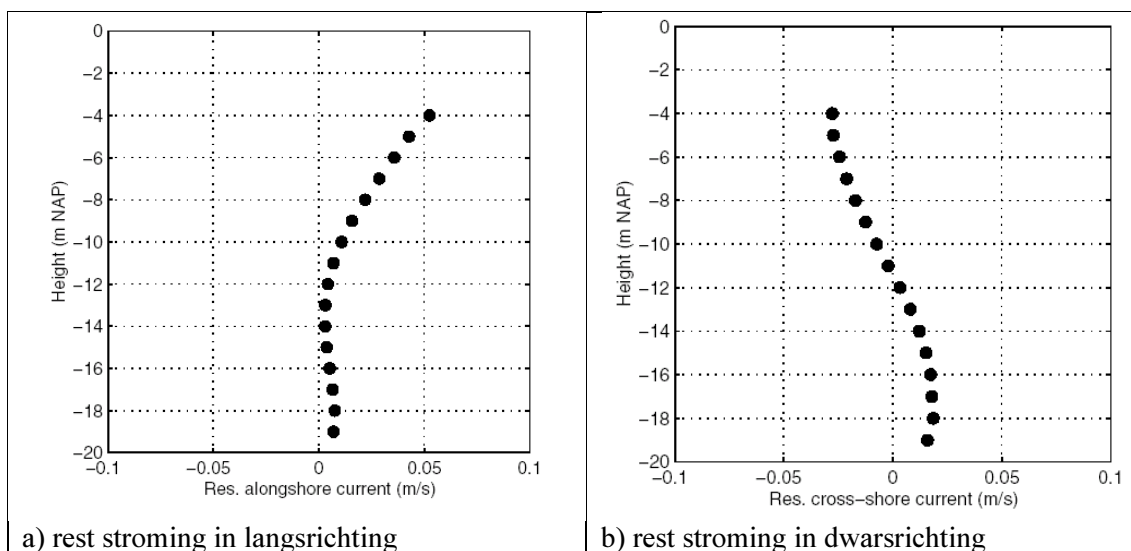
Windgedreven stromingen spelen een belangrijke rol in de bepaling van de tijdgemiddelde reststroming. Metingen bij Noordwijk (km 76) laten een sterke correlatie zien tussen de reststroomsnelheden en de windstress (Roelvink et al., 2001). Verondersteld kan worden dat de reststromingen in de nearshore zone windgedreven zijn. De hoofdzakelijke zuidwestelijke wind resulteert in rest windgedreven stromingen richting het noordoosten (240 graden t.o.v. het noorden), met snelheden van 0.05-0.10 m/s. In het geval van grote rivierafvoeren heeft de windgedreven stroming nog meer invloed.

Als gevolg van de werking van de wind kunnen op diep water grootschalige circulaties in de waterbeweging ontstaan. Deze grootschalige circulaties treden zeewaarts van de brandingszone op. Ten gevolge van deze circulaties kunnen, afhankelijk van de windrichting en de waterdiepte, zowel langsstromen als dwarsstromen aan het bodemoppervlak ontstaan. In de zone die zich uitstrekt vanaf een diepte van ca. 10m tot de brandingszone (de wrijvingsgedomineerde zone), blijkt er een verband tussen windrichting en stroming bij de bodem; een kustdwarse wind veroorzaakt een kustdwarse stroming bij de bodem in tegengestelde richting. Bovendien is er een verband tussen windsnelheid en stroomsnelheid. Omdat de zone met de windgedreven stroming grenst aan de brandingszone (opwoeling door golven) kan deze windgedreven stroming zandtransporten veroorzaken. Het laatste geldt ook voor de windgedreven stroming die ontstaat als gevolg van verschillen in windopzet langs de kust.

7.5 Rest stromingen

De residuele (over het getij gemiddelde) stroming in de omgeving van Hoek van Holland wordt sterk beïnvloed door de afvoer van het zoete water uit de Rijn, door wind en dichtheidsverschillen die allebei door variatie in wind en afvoer sterk variëren. De dichtheidsverschillen hebben een effect op de verticale turbulentiestructuur, waarbij soms gelaagdheid optreedt. Dit beïnvloedt dan weer de windgedreven stromingen. Daarnaast leiden horizontale gradiënten in dichtheid tot circulatiepatronen waarbij de onderstroom naar de kust gericht is en de bovenstroom naar de zee. Deze stroming is belangrijk voor het transport van onder andere slib.

Metingen bij Noordwijk (km 76) op 12 km uit de kust laat zien dat de stroming langs de kust vrijwel over de gehele verticaal noordelijk gericht is (Figuur 7-7). In de onderste lagen is de stroming klein, slechts 0.01 m/s. Op een diepte van ongeveer 10m is er echter een breekpunt te zien, waarbij de gemiddelde reststroming snel toeneemt tot ongeveer 0.05 m/s op 5 meter diepte. De stromingen in dwarsrichting zijn in de dieper gelegen gedeeltes van de waterkolom kustwaarts gericht en boven een diepte van 10 meter zijn deze zeewaarts gericht.



Figuur 7-7: Lange termijn bijdrage van de dwars -en langsstroming bij Noordwijk 12 km; positieve waarden zijn respectievelijk noordwaarts en kustwaarts transport (Roelvink, 2001)

Hoewel de kustlangse reststroming hoofdzakelijk noordwaarts gericht is op alle dieptes, zijn er toch opmerkelijke tijdsafhankelijke variaties in de verticale structuur van de stroming. Deze variaties worden veroorzaakt door variaties in de afvoer van de Rijn (Nieuwe Waterweg) en door variaties in windrichting en windsterkte. Bij vergelijking van eenzelfde maar tegenovergestelde wind stress (van 0.2 N/m^2) komen er kwantitatief aanzienlijke verschillen voor. Bij wind uit het zuiden is de reststroming (0.1 m/s noordwaarts) groter dan bij noorden wind (0.04 m/s zuidwaarts). Het debiet van de Rijn bij Lobith varieert tussen $750 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en $12000 \text{ m}^3/\text{jaar}$, met een gemiddelde van $2290 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en een standaarddeviatie van $1250 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Lage rivierafvoeren ($< 1125 \text{ m}^3/\text{jaar}$) corresponderen met een met een uniforme verdeling over verticaal, hoger afvoeren ($> 3375 \text{ m}^3/\text{jaar}$) veroorzaken grote reststromingen in de lagen aan het oppervlak tot 0.3 m/s .

De tijdsafhankelijke variaties in reststroming in dwarsrichting zijn veel kleiner. Stromingen aan de bodem zijn bijna altijd kustwaarts gericht en aan het oppervlak bijna altijd zeewaarts. Dit laat zien dat de dichtheidsgedreven circulatie een verschijnsel is dat het gehele jaar voorkomt. Bij een groter wordende kustwaarts gerichte wind stress, worden de kustwaarts gerichte reststroming aan de bodem kleiner en zijn soms zelfs zeewaarts gericht bij harde stormen. De responsie aan het oppervlak is echter klein. Het effect van aanlandige cross-shore wind is dus vooral merkbaar in de onderste lagen van de waterkolom.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij Noordwijk de verticale bijdrage van de reststroming in dwarsrichting grotendeels bepaald wordt door estuaria-achtige dichtheidsgedreven circulatie. Deze wordt iets gematigd door de cross-shore wind stress, consistent met het down-welling patroon.

Het effect van de dichtheidsverschillen door de afvoer van de Rijn is significant en beïnvloed de stroming vanaf Hoek van Holland tot minimaal Noordwijk.

8 Vergelijking sedimentbudget studies

8.1 Inleiding

Er zijn verscheidene studies gemaakt die het gedrag van de Hollandse kust beschrijven. De twee meest gebruikte en gerefereerde studies zijn die van Stive en Eysink (1989)¹ en de studie van Van Rijn (1995). Bij nadere beschouwing bestaan er echter grote verschillen tussen beide studies. Zo geven deze studies geen eenduidig beeld van de heersende transporten en van de kustlijnontwikkeling.

In dit hoofdstuk wordt gekeken wat de verschillen tussen beide studies zijn en waardoor deze ontstaan. In paragraaf 8.2 en 8.3 wordt een samenvatting van de sedimentbudget studies van respectievelijk Stive en Van Rijn gegeven. Aan het einde van beide paragrafen worden de conclusies van de auteurs gegeven en geëvalueerd. Vervolgens worden de studies van Van Rijn en Stive in paragraaf 8.4 met elkaar vergeleken. Daarna worden de langs -en dwarstransport waarden vergeleken met de waarden uit ander studies.

8.2 Samenvatting Stive

Doel:

Het geven van een voorspelling van de ligging van de kustlijn in 1990, 1995, 2000, 2010, 2050 en 2090. Niet alleen het verlangde onderscheidende vermogen in de tijd is groot, ook het verlangde ruimtelijk oplossend vermogen is hoog; in de orde van één kilometer.

Uitgangspunten:

- het huidige kustbeheer wordt voortgezet;
- geen grote civieltechnische ingrepen worden uitgevoerd;
- de huidige stijgingssnelheid van de zeespiegel blijft gehandhaafd (≈ 0.2 m/eeuw)

Gebiedsafbakening:

Tussen Den Helder en Hoek van Holland, vanaf de eerste duinenrij tot de -20m dieptelijn.

Model:

Het model beschrijft de ontwikkeling van de kustlijnligging en het brandingszone-profiel (duinvoet/ NAP -8m). Het gaat daarbij over de enkele jaren gemiddelde kustlijnligging of profielvorm, zodanig dat langjarige trends in kustpositie of dieptelijnen kunnen worden aangegeven. De gesloten kust wordt gedefinieerd als een kust waarlangs de autonome fysische processen slechts langzaam variëren.

Uitwerking balansvergelijking voor dynamisch kustprofiel (actieve zone):

Aannamen:

Het actieve kustprofiel is gemiddeld over zijn dynamische gedrag (brandingsruggen, duinafslag) in eerste benadering vormvast, waardoor deze zijn relatieve positie (in verticale zin) ten opzichte van gemiddeld zeeniveau (MSL) behoudt (zie Figuur 8-1). Daardoor is $h(x)$ invariant. De horizontale verplaatsingssnelheid (c_p) van het profiel wordt bepaald door de sedimentbalans. De respons op de hydrodynamische condities, waaronder de zeespiegelstijging, is min of meer instantaan. Morfologisch gezien is hier sprake van een sterke dynamische koppeling.

De horizontale verplaatsingssnelheid van het kustprofiel wordt in dit model beschreven met de formule:

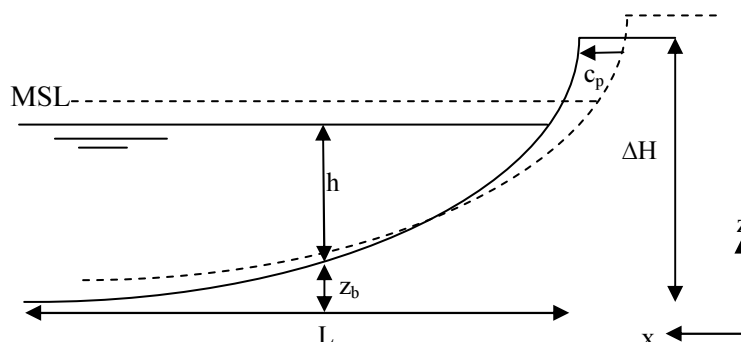
¹ In het vervolg van dit rapport wordt de studie van Stive en Eysink (1989) de studie van Stive genoemd.

$$c_p = -\frac{\partial MSL}{\partial t} \frac{L}{\Delta H} + \frac{(q_{x|zee} - q_{x|duin})}{\Delta H} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} (\Delta H)^{-1} + \frac{s}{\Delta H} \quad (8.1)$$

1)bruuneffect 2)dwarstr. 3)langstr. 4)brontermen

waarin: c_p = horizontale verplaatsingsnelheid profiel (m/jaar)
 q_x = dwarstransport p.e.v. breedte ($m^3/m/jaar$)
 Q_y = langstransport geïntegreerd over actieve zonelengte L ($m^3/jaar$)
 s = bronterm (bv. duinvorming) p.e.v. breedte ($m^3/m/jaar$)

In bijlage 4 wordt de afleiding van de gebruikte formule gegeven.



Figuur 8-1: Schematisatie dwarsprofiel actieve zone

Onderliggende fysische processen voor de kustontwikkeling:

1. Bruuneffect: profielaanpassing in verticale richting door zeespiegelniveau verandering (direct effect); kustachteruitgang bepaald door behoud van zandhoeveelheid en t.o.v. gemiddeld zeeniveau vormvast evenwichtsprofiel;
2. Dwarstransport vanaf de zeebodem en onderzeese oever: netto sedimenttransport vanaf de shoreface, bepaald door het offshore golfklimaat;
3. Langstransport gradiënten (inclusief indirecte effecten van zeespiegelrijzing) in de actieve zone: verschillen in het over de actieve zone geïntegreerde langstransport aan de randen van de sectie. In de autonoom bepaalde situatie (centrale deel Hollandse kust) worden deze transporten primair bepaald door het golfklimaat en secundair door het getij. In de niet autonoom bepaalde situatie (noordelijke deel Hollandse kust) bestaat het gerede vermoeden dat deze transporten worden bepaald door de bruto transportcapaciteit van de het estuarium intredende stroming en speelt de zandvraag van het estuarium een rol;
4. Verlies door duinvorming: netto transportverlies over de top van de eerste duinregel.

Calibratie:

JARKUS-bestand 1965-1985 en trendanalyses 1850-1985.

Beperkingen/toepasbaarheid:

Uit de definiëring van het conceptuele model voor de uniforme kust volgt dat de toepasbaarheid is beperkt tot kusttrajecten die niet overheerst worden door ruimtelijke tweedimensionale processen. Dit betekent dat het model niet toepasbaar is voor kusttrajecten in de directe nabijheid van havenmondingen en estuariamondingen (binnen enkele kilometers). Ook modellering van periodieke fluctuaties (zoals zandgolven) is met dit model niet mogelijk.

Invoerwaarden/ randvoorwaarden:

In Tabel 8-1 worden de invoerwaarden van het model van de actieve zone gegeven. Een positieve waarde voor het dwarstransport betekent kustwaarts transport en een positieve waarde voor het langstransport komt overeen met transport in noordwaartse richting.

Sectie	locatie (km)	L= breedte actieve wig (m)	ΔH =hoogte actieve wig (m)	$q_{x zee}$ =dwarstransport zeezijde ($m^3/m/jaar$)	δQ_y =langstransport ($10^3 m^3/jaar$)	δy =kustlengte (km)
HvH-Schev.	118-103	800	20	10	90	10
Schev.-Noordwijk	103-76	1250	23	11	30	27
Noordwijk-IJmuiden	76-57	1500	25	11	-40	19
IJmuiden-Egmond	54-37	1000	25	11	25	10
Egmond-Groet	37-26	800	23	12	200	10
Petten-Gr.Keeten	20-10	600	23	12	300	10
Gr.K-Den Helder	10-0	750	23	12	350	10

Tabel 8-1: Invoerwaarden model (+ kustwaarts, noordwaarts; - zeewaarts, zuidwaarts)

De breedte en hoogte van het actieve wig (L en ΔH) komen uit profielmetingen uit het JARKUS-bestand. De schattingen van het dwarstransport aan zeezijde (NAP-8m) komen van een fysisch-mathematisch model. De waarden van het langstransport komen deels uit de calibratie van het model en deel van hetzelfde fysisch-mathematisch model.

Fysisch-mathematisch model:

De twee hoofdgroepen van beschouwde hydrodynamische processen in dit model zijn door getijde geïnduceerde stromingen en door golven geïnduceerde stromingen, waarbij ook de interactie en/of combinatie van beide een rol speelt.

De *getijsimulatie* is gekalibreerd aan de hand van de beschikbare metingen (Spanhoff et al, 1987; Borst, 1987). De beschouwde processen zijn:

- verticaal getij (waterstanden), M2 en M4;
- horizontaal getij (stroomsnelheden), M2 en M4.

Het *golfklimaat* aan de zeewaartse rand van de raaien is bepaald aan de hand van een bewerking van de meetresultaten over een 10-jarige periode, zoals deze bekend zijn van de meetstations Goeree, IJmuiden en Eierland. Uit deze metingen is een golfklimaat gehaald, die wordt onderscheiden in golfhoogte - en golfperiodeklassen per (wind)-richtingsklasse van 30 graden (Roskam, 1988). De beschouwde processen zijn:

- waterstandsopzet gekoppeld aan golfcondities;
- waterstandsopzet door golfgeïnduceerde set-up;
- langdurige reststroming;
- golfvoortplanting: refractie en breking;
- golfgedreven nettostromen in voortplantingsrichting: asymmetrische stroming, bodemgrenslaag stroming en brandingsretour stroming;
- golfgedreven nettostromen in kustlangsrichting: kustdriftstroming;

In de raaien zelf is het golfklimaat bepaald met behulp van golfvoortplantingsberekeningen via het model ENDEC, waarbij de effecten refractie, breking en set-up zijn meegenomen. Uit de berekende locale grootheden zijn de netto golfgedreven effecten, zoals asymmetrie-stroming, bodemgrenslaagstroming, brandingsretourstroming en brandingslangsstroming berekend (zie voor formuleringen De Vriend en Stive, 1988; Stive en De Vriend 1987; Roelvink en Stive, 1989). De bovenbeschreven hydrodynamische grootheden, zoals de netto stromingen en de niet-lineaire golfeffecten, zijn als input gebruikt voor de berekeningen van het initiële sedimenttransport via de formuleringen van Bailard (1981) (zie bijlage 3).

Voor de schattingen van het langstransport wordt in de (quasi-) autonome ontwikkelende kustsecties gebruik gemaakt van de waarden komend uit het fysisch-mathematisch model.

Voor de zich niet-autonoom ontwikkelende kustsecties volgt deze per definitie niet uit deze kwantificering, en moet teruggevallen worden op calibratie aan de hand van waargenomen ontwikkelingen. De toeleveringscapaciteit van de aangrenzende kustdelen wordt gepresenteerd middels de gradiënt in het netto langtransport. Het zijn vooral de mechanismen achter deze langtransport gradiënt die de verschillende kustsecties zich van elkaar doen onderscheiden. De ontwikkeling van de kustlijn zelf is verder volledig beschreven door gebruik te maken van het conceptuele model voor de uniforme kust, waarbij dus de invloed van de estuaria zit opgesloten in de netto langtransport gradiënt.

Uitkomsten:

In Tabel 8-2 wordt de schattingen van de kustlijnverplaatsing per sectie gegeven, volgend uit het model van het dynamische kustprofiel. De transporten zijn weergegeven in Figuur 8-2.

Schatting (m/jaar)							
kustraject	HvH-Sch	Sch-Nwijk	Nwijk-IJmuid.	IJmuid.-Egm.	Egm.-Groet	Petten-GrK	GrK-DenHel.
Langtransport	-0.45	-0.05	0.08	-0.10	-0.87	-1.30	-1.52
Dwartransport	0.50	0.48	0.44	0.44	0.52	0.52	0.52
Brontermen	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
Bruun-effect	-0.08	-0.11	-0.12	-0.08	-0.07	-0.05	-0.07
Totaal	-0.08	0.28	0.36	0.22	-0.46	-0.88	-1.11

Tabel 8-2: Reconstructie kustlijnverplaatsing (in m/jaar) per fysische component

Conclusies van Stive:

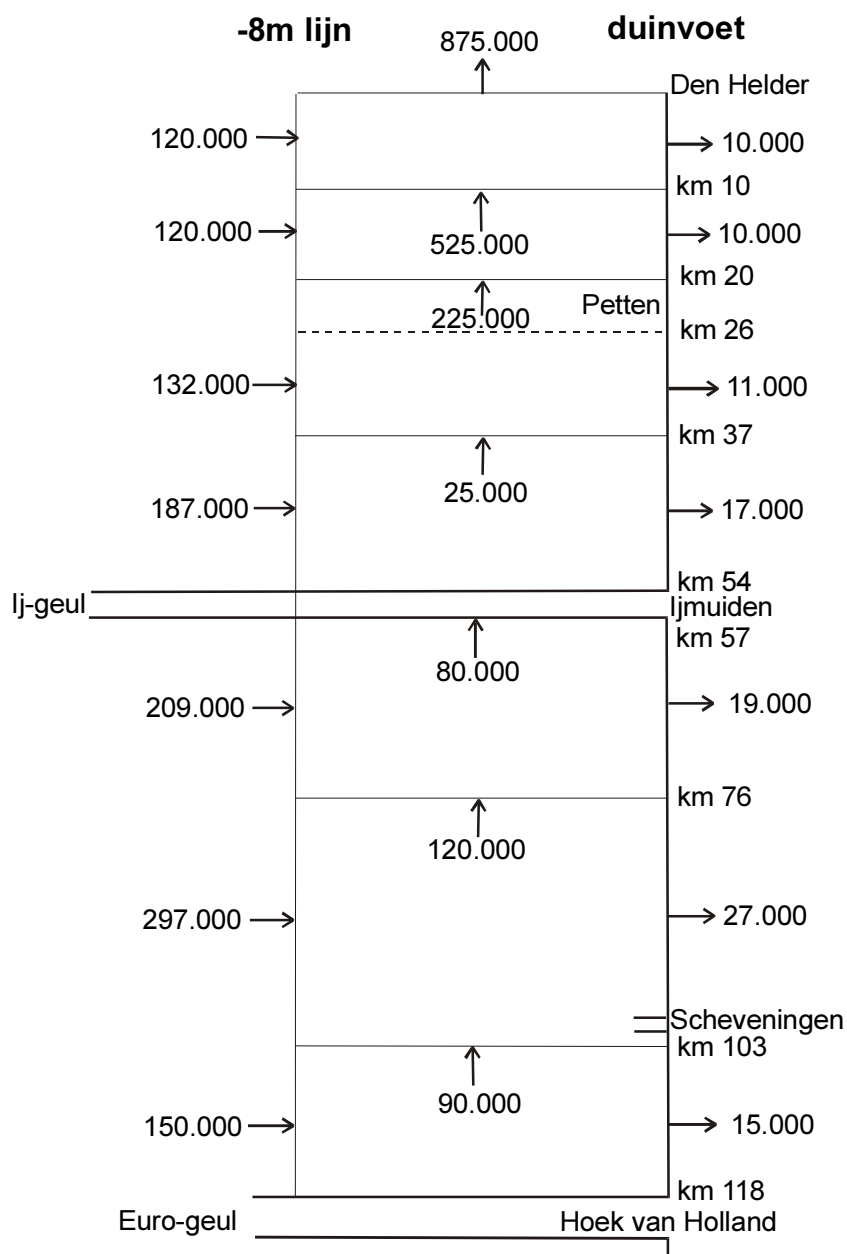
Er is een tweedeling te zien in de stabiliteit van de kustlijnligging tussen Hoek van Holland en Den Helder.

Tussen Hoek van Holland en Egmond is de kust relatief stabiel, de sectie Scheveningen - Egmond laat een trend van kleine hoeveelheden sedimentatie zien. Deze sedimentatie wordt veroorzaakt doordat de invloed van het kustwaarts gerichte dwarstransport hier relatief groot is. In de sectie Hoek van Holland - Scheveningen erodeert de kust door de daar overheersende invloed van het langtransport, die wordt veroorzaakt door de blokkerende werking van de havendammen van Hoek van Holland.

Tussen Egmond en Den Helder is de kust minder stabiel. De erosie is in deze sectie erg groot en hoe dichter je bij Den Helder komt des te groter deze wordt. De erosie vindt voornamelijk plaats doordat de langtransport gradiënt hier erg groot is, zonder deze langtransport gradiënt zou er zelf sedimentatie plaats vinden. De grote zandimporterende capaciteit van het Marsdiep estuarium is waarschijnlijk de belangrijkste oorzaak van de steeds groter wordende langtransport gradiënt richting Den Helder.

De invloed van de brontermen (duinvorming, dwarstransport over de top van de eerste duinregel) is relatief klein (geschat op $\pm 2-6$ % van de totale transporttermen), maar niet te verwaarlozen. De kustlijnverplaatsing door brontermen is constant langs de gehele Hollandse kust, de totale waarde van alle transporttermen varieert echter veel. Daardoor is de relatieve belangrijkheid van de brontermen in de ene sectie een stuk groter dan in de andere. Het grootste relatieve effect langs de Hollandse kust door deze brontermen is in de sectie Hoek van Holland - Egmond.

Het zeespiegelrijzingseffect heeft meer invloed in de meeste kustsecties dan de brontermen, namelijk 2-17 %. Hiervan is tussen Hoek van Holland en Egmond het relatieve effect het grootste, met uitschieters tussen Scheveningen en IJmuiden. Dit wordt veroorzaakt door de daar kleinere steilheid van het kustprofiel, waardoor je een grotere erosie van de kustlijn krijgt bij één dezelfde zeespiegelrijzing.



Figuur 8-2: Sedimenttransporten (in m³/jaar) langs de Hollandse kust volgens Stive

Netto resulteert er langs de Hollandse kust een sedimentatie volume van 231.000 m³/jaar tussen de -8m lijn en de duinvoet.

Evaluatie:

Bij de studie van Stive werd er vooraf vanuit gegaan dat het huidige kustbeheer wordt voortgezet. Dit is er echter niet gebeurd, want men is overgegaan op de invoering van de Basis Kustlijn (BKL), waarbij de kustlijn blijft gehandhaafd op de plaats waar deze in 1990 lag. Daardoor zijn de voorspellingen van de kustlijnverplaatsing niet meer relevant. De transportwaarden die uit het model komen zullen daarentegen waarschijnlijk weinig veranderd zijn en daardoor wel goed bruikbaar voor de schatting van de transporten voor 1990. Voor de periode na 1990 is het echter de vraag wat het effect is van de grote toename van de suppleties volumes op de transporten langs de Hollandse kust.

Het langtransport varieert kwantitatief erg veel langs de Hollandse kust. Ten zuiden van Egmond is het langtransport relatief een stuk kleiner dan ten noorden van Egmond. Daardoor

wordt in de kuststrook ten noorden van Egmond de kustligging grotendeels bepaald door deze relatief grote langtransport gradiënt. De naar het noorden steeds groter wordende langtransport gradiënt wordt verklaard door de grote zandimporterende capaciteit van het Marsdiep estuarium. De achterliggende processen zijn echter onbekend.

Het dwarstransport over de -8m dieptelijn is redelijk constant. Er is langs de gehele kust een netto kustwaarts dwarstransport waar te nemen. Het dwarstransport wordt volgens Stive primair bepaald door het diep water golfklimaat, wat weinig varieert langs de kust. In paragraaf 4.5.2 is echter gebleken dat het ondiep water golfklimaat niet constant is langs de kust, vooral richting Den Helder. Verondersteld wordt daarom dat de variatie in de dwarstransport waarden groter is dan wordt aangenomen en de grote van de transportwaarden aanzienlijk kunnen afwijken. Bovendien zijn wind -en getijgedreven stromingen verwaarloosd. Dichtheidsgedreven stromingen door uitstroming van de rivier de Rijn zijn ook niet meegenomen, terwijl dit een belangrijke component van het dwarstransport proces is (zie hoofdstuk 9).

Voor de bronterm die door duinvorming (netto transport over de top van de eerste duinregel) wordt bepaald, is een constante waarde aangenomen. De breedte van het strand en de hoogte van de duinen variëren echter langs de kust. Het is daarom niet aannemelijk dat deze bronterm constant is.

De relatieve zeespiegelstijging wordt bij de reconstructie door middel van de Bruun-regel meegenomen. Er is een waarde aangenomen voor de relatieve zeespiegelstijging van 0.20 m/eeuw. Deze waarde komt goed overeen met de huidige stijging. De Bruun-regel gebruikt de steilheid van het profiel om de kustlijnverplaatsing te bepalen. De steilheid van het profiel is daarbij omgekeerd evenredig met de kustlijnverplaatsing. In bijlage 7 wordt verder ingegaan op het effect van zeespiegelrijzing.

8.3 Samenvatting Van Rijn

Doel:

Een reconstructie van de kustlijnontwikkeling tussen Den Helder en Hoek van Holland in de periode 1964-1992 en een voorspelling van de kustlijnontwikkeling en de daarmee geassocieerde suppleties voor een periode van 10 tot 50 jaar inclusief het effect van zeespiegelstijging.

Uitgangspunten:

- Het morfologische gedrag van de compartimenten is (quasi)-uniform in langsricting, dat betekent dat de hydrodynamische en morfologische parameters constant zijn of een constante gradiënt hebben in de ruimte.
- De compartimenten gedragen zich quasi-stationair in de tijd, dat wil zeggen een langzame en geleidelijke variatie van morfologische processen op grotere schaal.

Gebiedsafbakening:

Vanaf de NAP +3m dieptelijn tot de NAP -20m dieptelijn tussen Den Helder en Hoek van Holland (km 0-118.5).

Model (zie Figuur 8-3):

Gebaseerd op een schematisatie van het cross-shore profiel (NAP +3m/-20m) in 3 rechthoekige subzones (surf (+3/-3m), middle shoreface (-3/-8m) en lower shoreface (-8/-20m)). Het beschrijft de zandvolume verandering (m^3 /jaar) en de daarmee corresponderende veranderingen in de karakteristieke diepte contouren in 16 verschillende delen van het kustgebied, gegeven de gradiënten van het berekende dwars- en langtransport en bronnen/dalingstermen (suppletie, storten, baggeren). De zeebodem is weergegeven door een

ruimtegemiddeld (eliminatie van de banken) en tijdgemiddelde bodem. Uit het massabehoud volgt voor de volumeveranderingen van de vakken:

$$V_U = C_U - C_D + \Delta L_U + \Delta X_{U,S} (\alpha h_D + h_U) B + S_U \quad (8.2)$$

$$V_M = C_M - C_U + \Delta L_M - \Delta X_{U,S} (\alpha h_D + h_U) B + S_M \quad (8.3)$$

$$V_L = C_L - C_M + \Delta L_L + S_L \quad (8.4)$$

waarin:

V_U, V_M, V_L	= jaarlijkse gemiddelde zandvolume verandering (m ³ /jaar);
C_U, C_M, C_L	= jaarlijkse gemiddelde dwarstransport (m ³ /jaar);
$\Delta L_U, \Delta L_M, \Delta L_L$	= jaarlijkse gemiddelde langstransport verschil tussen de gebieden (m ³ /jaar);
S_U, S_M, S_L	= bronnen/dalingen (m ³ /jaar);
h_D, h_U, h_M, h_L	= hoogte (m);
$\Delta X_U, \Delta X_M, \Delta X_L$	= horizontale verplaatsing van diepte contour (m/jaar);
$\Delta X_{U,S}$	= horizontale kustlijnverplaatsing door zeespiegelstijging, gebaseerd op de Bruun-regel (m/jaar);
B	= lengte in langsrichting van een kustsectie (m);
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	= calibratiecoëfficiënten.

Voor de dwarsverandering van de dieptecontouren geldt:

$$\Delta X_U = \frac{V_U}{\alpha_1 (h_D + h_U) B} \quad (8.5)$$

$$\Delta X_M = \frac{2V_M}{\alpha_2 h_M B} - \Delta X_U \quad (8.6)$$

$$\Delta X_L = \frac{2V_L}{\alpha_3 h_L B} - \Delta X_M \quad (8.7)$$

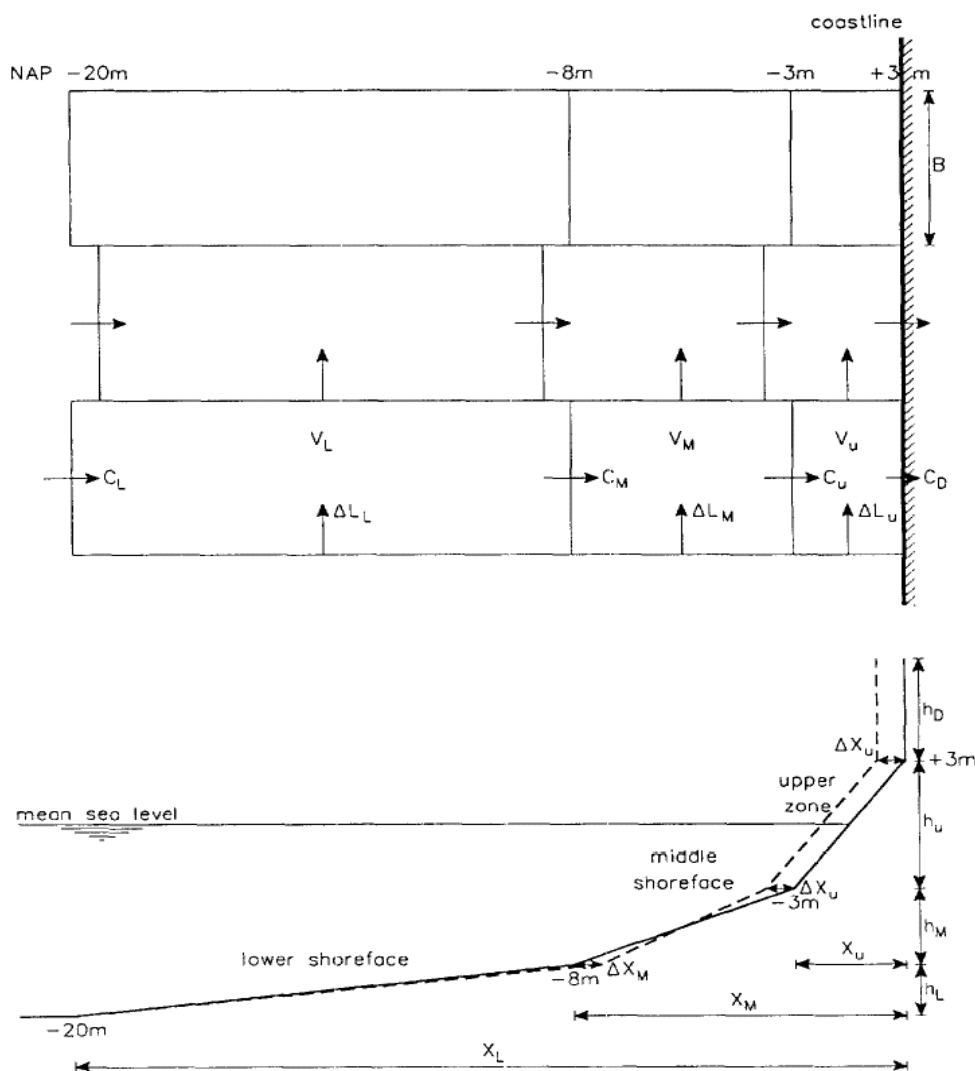
Zeespiegelrijzingseffect:

Deze wordt weergegeven via de Bruun-regel (Bruun, 1962; Bruun, 1988), waarbij de sluitingsdiepte aan de zeewaartse rand ligt op NAP -5,5m.

$$\Delta X_{U,S} = \frac{1/2r (X_M + X_U)}{(\alpha_4 h_D + h_U + 1/2h_M)} \quad (8.8)$$

waarin,

$\Delta X_{U,S}$	= horizontale kustlijnverplaatsing door zeespiegelstijging;
r	= zeespiegelrijzing (m/jaar);
α_4	= coëfficiënt die de effectieve duinerosie-hoogte weergeeft (0-1).



Figuur 8-3: Compartimenten en geschematiseerd bedprofiel

Onderliggende fysische processen:

1. Dwarstransport gradiënten;
2. Langstransport gradiënten;
3. Bruun-effect: zeespiegelrijzingseffect via Bruun-regel.
4. Bronterm: suppleties, storten en baggeren.

Calibratie:

Bathymetrische data (JARKUS data base 1964-1992) → jaarlijkse gemiddelde zandvolume verandering (erosie, sedimentatie, suppletie en bagger volumes).

Beperkingen/toepasbaarheid:

Korte termijn responsie van de zeebodem op hydrodynamische gebeurtenissen, zoals stormen, kunnen niet gemodelleerd worden. Het model geeft de meest realistische waarden in de secties, die niet direct aanliggend aan civieltechnische constructies en zeegaten (Marsdiep) zijn. Daar kunnen de transportwaarden niet nauwkeurig bepaald worden, omdat het gedrag van de transportgradiënten in de tijd onbekend is.

Invoerwaarden/randvoorwaarden:

In het model worden ingevoerd de gradiënten van het jaarlijkse gemiddelde langs -en dwarstransport op de grenzen van de compartimenten, de beschikbare gegevens van strandsuppleties, storten en baggeren in dezelfde periode, geometrische informatie en

calibratie coëfficiënten. Voor elk dwarsprofiel zijn 8 verschillende berekeningen gemaakt voor de sedimenttransporten met een fysisch-mathematisch model. Vervolgens zijn gebaseerd op de resultaten van een gevoeligheids- en nauwkeurighedsanalyse schattingen van de jaarlijks gemiddelde transportwaarden gemaakt (zie Tabel 8-3 en Tabel 8-4).

dwarsprofiel	kustlijn-oriëntatie (°)	profielsteilheid (-)	jaarlijks gem. langtransport tussen kustlijn en NAP -8m lijn (m ³ /jaar)		
			noord (pos)	zuid (neg)	netto
14	15	0.008	1.133.333	-566.667	566.667 (± 50%)
28	7	0.008	966.667	-483.333	483.333 (± 100%)
40	8	0.008	600.000	-300.000	300.000 (± 100%)
47	10	0.006	500.000	-250.000	250.000 (± 75%)
68	21	0.005	500.000	-250.000	250.000 (± 50%)
76	26	0.005	500.000	-250.000	250.000 (± 50%)
92	37	0.006	633.333	-316.667	316.667 (± 50%)
103	40	0.008	1.200.000	-600.000	600.000 (± 50%)
108	41	0.012	1.266.667	-633.333	633.000 (± 50%)

Tabel 8-3: Schattingen van jaarlijks gemiddelde langtransport waarden in de surfzone (NAP - 8/+3m) zonder de aanwezigheid van constructies

dwarsprofiel	Jaarlijks gemiddelde totaal transport (m ³ /m/jaar)			
	cross-shore		longshore	
	diepte = 20m	diepte = 8m	diepte = 20m	diepte = 8m
14 Callantsoog	5 +/- 10	0 +/- 10	75 +/- 30	150 +/- 60
40 Egmond	15 +/- 10	0 +/- 10	60 +/- 25	135 +/- 50
76 Noordwijk	10 +/- 10	0 +/- 10	35 +/- 15	85 +/- 15
103 Scheveningen	0 +/- 10	0 +/- 10	25 +/- 15	65 +/- 40

(+ kustwaarts/noordwaarts; - landwaarts/zuidwaarts)

Tabel 8-4: Schattingen van jaarlijks gemiddelde totale transportwaarden op 8 en 20m diepte zonder de aanwezigheid van constructies

De relatief grote langtransport waarden in de sectie 15-40 km wordt veroorzaakt door de grote profielsteilheid, en groter wordende getij-asymmetrie, en in mindere mate door de grotere golfaanval in het noorden. In de sectie 90-110 km wordt het relatief grote langtransport veroorzaakt door de grote kustlijnoriëntatie en profielsteilheid. De resultaten van bovenstaande tabel zijn geldig voor een natuurlijke kust zonder de aanwezigheid van constructies, zoals havendammen. De zandtransporten zoals eerder genoemd moeten gecorrigeerd worden aan de bijdrage van het effect van deze constructies. In deze studie wordt het blokkerende effect van de strandhoofden geschat op 20-50% van het ongestoorde netto langtransport in de brandingszone. Bij de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland wordt het langtransport vrijwel in zijn geheel geblokkeerd. Door deze barrières versnelt/convergeert de getijdenstroming bovenstrooms (ten zuiden) van de barrières en vertraagd/divergeert de stroming benedenstrooms (ten noorden). De convergerende stroming bovenstrooms wekt een zeewaarts dwarstransport op, daardoor gaat er sediment uit de surfzone naar de shoreface zone en benedenstrooms vindt er een landwaarts gericht transport plaats. Schattingen van de netto stromings-gerelateerde dwarstransporten over de NAP -8m dieptelijn bij IJmuiden zijn in orde van grootte van 15-50 m³/m/jaar.

Fysisch-mathematisch model:

Om de jaarlijks gemiddelde zandtransportwaarden op de randen van de compartimenten te berekenen, is een fysisch-mathematisch model gebruikt, die de hydrodynamische- en zandtransport processen beschouwt, gebaseerd op een 1D benadering, loodrecht op de kust (van Rijn et al., 1994). De cross-shore hydrodynamische processen worden volledig weergegeven, waar de gradiënten in de langtransport processen worden verwaarloosd. Er

wordt een geïntegreerd model gebruikt, namelijk het UNIBEST- model (Roelvink en Reniers, 1994) van Delft Hydraulics, die bestaat uit 3 submodellen:

- Golfpropagatie-model: berekent de golfenergie vermindering langs een "golfstraal", door shoaling, refractie en energie dissipatie door bodemwrijving en breking. Het effect van de verticale golfasymmetrie in shoaling-golven op de instantane en tijdgemiddelde bodemsnelheden wordt meegenomen. Ook het effect van gebonden lange golven op de bodemsnelheden wordt weergegeven, gebruik makend van uitdrukkingen voor smalbandige golfspectra (Klopman, 1991; Roelvink, 1993). De instantane bodemsnelheden zijn berekend als tijdseries die onregelmatige golfgroepen weergeven (inclusief golfasymmetrie en gebonden lange golf effecten);
- Verticale stromingsstructuur model: berekent de verticale bijdrage van de horizontale stromingssnelheden voor een gegeven diepte gemiddelde snelheidsvector, golfhoogte en periode, vloeistofdichtheidsgradiënten en wind oppervlaktetspanning. Het effect van breking, resulterend in een stroming in langsrichting en een retourstroming in dwarsrichting (undertow) en het Coriolis-effect worden ook meegenomen.
- Zandtransportmodel: berekent de grootte en de richting van het bodem -en suspensie transport. Het bodemtransport wordt berekend gebruik makend van instantane bodemsnelheden, die zijn omgezet naar bodemschuifspanningen (binnen de golfperiode), met de functie van Ribberink (1997). Het suspensietransport wordt uitgerekend via tijdgemiddelde snelheden en concentratie profielen (Van Rijn, 1993). De formule van Bailard-Bagnold is gebruikt voor de gevoeligheidsberekeningen. De sedimenttransportwaarden zijn berekend voor het geschematiseerde golf -en corresponderende stromingsklimaat.

Deze benadering wordt verondersteld geldig te zijn voor kustsecties die in langsrichting redelijk uniform zijn (lengteschaal van ongeveer 5km). De shoreface zone tot de -8m diepte contour is relatief stabiel over een tijdschaal van jaren, de dynamische koppeling tussen de hydrodynamische en morfologische processen kan worden verwaarloosd.

Jaarlijks gemiddelde dwarstransport over de NAP +3m-lijn door eolische processen:

Volgens De Ruig (1989) is er een sedimentatievolume van 400.000 m³/jaar in de strand -en duinzone tussen Den Helder en Hoek van Holland. In de studie van Van Rijn wordt het sedimentatievolume in de duinzone, buiten de NAP +3m lijn geschat op 280.000 m³/jaar (Tabel 8-5), overeenkomend met een netto transportwaarde van 2.5 m³/m/jaar over de NAP +3m lijn (Van Vessem en Stolk, 1990). Deze hoeveelheid is als volgt verdeeld:

sectie	netto kustwaarts transport	sectie	netto kustwaarts transport
0-8km	20.000	56-60km	30.000
8-50km	100.000	60-108km	50.000
50-55km	30.000	108-118km	50.000

Tabel 8-5: Verdeling van netto dwars windgedreven zandtransport over de NAP +3m dieptelijng langs de Hollandse kust (in m³/jaar)

Relatief grote sedimenttransportwaarden (4-6 m³/m/jaar) komen voor bij brede stranden (in aanzandingsgebieden bij havendammen), in de andere zones wordt een kleinere waarde aangenomen (1-3 m³/m/jaar).

Reconstructie van waargenomen morfologische data (1964-1992):

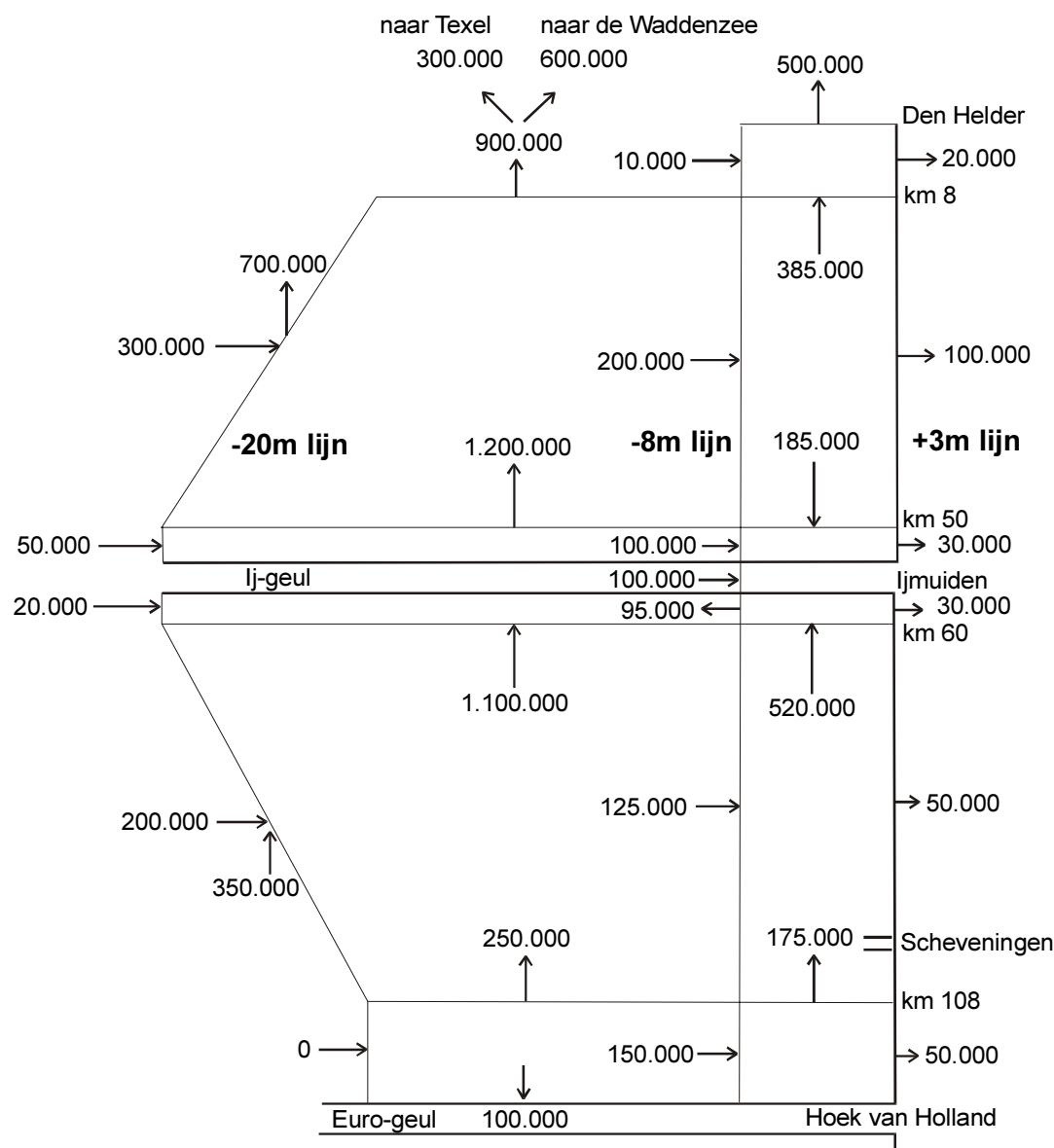
Bij de reconstructie wordt de relatieve zeespiegelstijging niet meegenomen (r=0). De reconstructie is vooral gericht op de zone tussen NAP +3 en -8m, omdat het meeste van de beschikbare zandvolume gegevens uit deze zone komt.

De bedoeling is om de waargenomen volumeveranderingen overeen te laten komen met de berekende zandtransportwaarden, waarbij ook de bagger -en suppletievolumes worden meegenomen. Er wordt verwacht dat er redelijke resultaten worden gevonden voor de

(uniforme) kustsecties, buiten de invloed van constructies en zeegaten. De transportwaarden in de niet-uniforme kustsecties bij de havendammen en het Marsdiep worden bepaald door calibratie, gebruik makend van de beschikbare sedimentatie en erosie volumes.

NAP +3m/-8m:

De netto totale lange termijn zandvolumeverandering (afgeleid uit profiel data 1964-1992) inclusief suppleties is 125.000 m³/jaar (sedimentatie) tussen Den Helder en Hoek van Holland. Het netto langstransport bij Den Helder is 500.000 m³/jaar noordwaarts. Het netto langstransport bij Hoek van Holland en IJmuiden is nul door de havendammen en de aanwezigheid van een diepe toegangsgeul bij Hoek van Holland die als zandtrap werkt. Het netto windgedreven dwarstransport over de NAP +3m dieptelijn is 280.000 m³/jaar (Van Vessem en Stolk, 1990).



Figuur 8-4: Sedimenttransporten (in m³/jaar) in de kustzone tussen Den Helder en Hoek van Holland (NAP +3/-20m).

Het netto dwarstransport over de NAP -8m dieptelijn komt als sluitingsvolume (na suppletie en baggervolumes) uit op 490.000 m³/jaar in landwaartse richting. Dit komt overeen met 4 m³/m/jaar. Waarschijnlijk is deze waarde iets lager in de centrale secties en hoger dichterbij de havendammen. De naar het noordengaande vloedstroming wordt dominant verondersteld,

daardoor heb je een zeewaarts dwarstransport ten zuiden van de dam en een kustwaarts dwarstransport ten noorden van de dam. Hierdoor krijg je de volgende geschatte waarden:

50-55km:	netto dwarstransport	= 100.000 m ³ /jaar (landwaarts)	= 20 m ³ /m/jaar
56-60km:	netto dwarstransport	= 95.000 m ³ /jaar (kustwaarts)	= 23.75 m ³ /m/jaar
108-118km:	netto dwarstransport	= 150.000 m ³ /jaar (landwaarts)	= 18.75 m ³ /m/jaar

Het stromingsgerelateerde dwarstransport over de -8m dieptelijn wordt in de secties 0-50km en 60-108km geschat op 3.5 m³/m/jaar in kustwaartse richting.

Het daarmee overeenstemmende zandbudget is voor de zone NAP +3m/-8m (zie Figuur 8-4):

In:	suppleties	= 440.000 m ³ /jaar
	→ netto kustwaarts dwarstransport (NAP -8m)	= 490.000 m ³ /jaar
Uit:	netto langstransport (Den Helder)	= 500.000 m ³ /jaar
	netto kustwaarts dwarstransport (NAP +3m)	= 280.000 m ³ /jaar
	baggeren haven Scheveningen	= 25.000 m ³ /jaar
In-Uit:	resulterende sedimentatie	= 125.000 m ³ /jaar

NAP -8m/-20m:

Betrouwbare gegevens van zandvolume veranderingen zijn alleen beschikbaar in de zone vanaf NAP -8m tot -12m. Gebaseerd op deze data worden erosievolumes van 350.000 m³/jaar gevonden voor ieder van de secties 8-50km en 60-108km. Dumping van zand vond plaats op verschillende locaties buiten de NAP -15m dieptelijn:

- 700.000 m³/jaar op "Loswal Wijk aan Zee" ten noordwesten van IJmuiden;
- 125.000 m³/jaar op "Loswal Scheveningen" ten noordwesten van Scheveningen.

Er is 75.000 m³/jaar gebaggerd in de sectie 60-108 km. Alle bijdrage in beschouwing nemend vindt er erosie plaats van 750.000 m³/jaar tussen Den Helder en Hoek van Holland. De jaarlijks gemiddelde transportwaarden op de grenzen zijn afgeleid door de gemiddelde en berekende transportwaarden te interpoleren.

In Figuur 3-7 staan de erosie -en sedimentatievolumes, die voor deze studie gebruikt zijn. Deze waarden volgen uit het JARKUS-bestand 1964-1992. In de secties direct aanliggend aan de havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden is er veel sedimentatie waar te nemen, vrijwel elke andere sectie laat een trend van erosie zien.

Conclusies van Van Rijn:

In de zone NAP -8/+3m vindt vrijwel langs de gehele Hollandse kust erosie plaats. Slechts in de secties direct aanliggend aan de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland is er netto sedimentatie. Deze sedimentatie is echter zo groot dat er netto sedimentatie resulteert langs de Hollandse kust in de strand -en surfzone van 125.000 m³/jaar. Alle secties laten in de midden shoreface zone (NAP -8m/-12m) erosie zien, behalve de secties die aan de havendammen van IJmuiden grenzen. Dit resulteert in een erosievolume van 750.000 m³/jaar.

Uit de gevoeligheidsberekeningen volgt dat het langstransport in de brandingszone het meeste wordt beïnvloed door het golfklimaat, de diepte-gemiddelde langsstroming, de aanwezigheid van brekerbanken, de bodemhelling en de korreldiameter. De onzekerheid van de transportwaarden is nog erg groot. Er wordt verondersteld dat de richtingen van de transporten redelijk overeen komen met de werkelijkheid, maar dat de waarden zeker met een factor 2 zou kunnen afwijken.

Het dwarstransport over de -20m dieptelijn is kustwaarts gericht en varieert van 0-15 m³/m/jaar en het dwarstransport over de -8m dieptelijn varieert langs de Hollandse kust van circa -15 tot + 15 m³/m/jaar. Netto kustwaarts gerichte transporten worden veroorzaakt door het Longuet-Higgins stromingseffect, asymmetrie in golfsnelheden en dichtheidsgradiënten. Netto zeewaarts gerichte transporten worden veroorzaakt door lange golfeffecten en de undertow. Relatief fijn zand resulteert in een zeewaarts transport en relatief grof zand in een kustwaarts transport.

Bij de havendammen van IJmuiden is volgens Van Rijn het stromings-gerelateerde transport door het getij dominant boven het golfgerelateerde transport. Doordat de naar het noorden gaande vloedstroming dominant is, krijg je ten zuiden van de havendammen convergentie van de stroming en ten zuiden van de havendammen divergentie. Daardoor versnelt de stroming ten zuiden van de havendammen en veroorzaakt een zeewaarts transport. Ten noorden van de havendammen vertraagt de vloedstroming en daar levert dit een kustwaarts transport op.

Evaluatie:

Het langstransport varieert erg veel langs de kust volgens Van Rijn. Vanaf Hoek van Holland neemt deze gestaag toe tot aan IJmuiden, waar deze door de havendammen geheel geblokkeerd wordt. Vanaf IJmuiden neemt het langstransport constant toe richting Den Helder. Van Rijn relateert dit aan de grotere profielsteilheid, en de groter wordende getij-asymmetrie, en in mindere mate van de grotere golfaanval in het noorden. En grotere golfaanval in het noorden is echter niet waarschijnlijk, omdat de golfhoogte op diep water vrij constant is langs de kust. Een afname van de golfhoogte richting het noorden is eerder aannemelijk door het golfafschermende effect van de buitendelta (zie paragraaf 7.2.1).

Het volume aan eroderende zand langs de Hollandse kust ($500.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$) zou het Marsdiep estuarium ingaan. Recente inzichten (zie paragraaf 3.4) laten echter zien dat er weinig zandimport in het Waddengebied is. Daarom is het aannemelijker dat niet dit gehele volume de Waddenzee ingaat, maar ook een groot deel naar de meer noordelijk gelegen kusten (Waddeneilanden) en/of naar de buitendelta gaat.

De dwarstransport waarden komen via het sluitingsvolume uit de volumebalans. Het dwarstransport varieert volgens Van Rijn erg veel langs de Hollandse kust. Volgens de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn is het dwarstransport zeer gevoelig voor een aantal parameters, zoals windeffecten, dichtheidsgradiënten en allerlei golfeffecten (zie paragraaf 9.3.2). Het totale effect van deze parameters op de variatie van het dwarstransport langs de kust is daardoor moeilijk te bepalen. De havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland blijken een groot effect te hebben op het dwarstransport, terwijl dit effect ook voor een groter deel in het langstransport merkbaar zou kunnen zijn.

Doordat ook dichtheidsgedreven stromingen en windeffecten zijn meegenomen in het fysisch-mathematische model, zijn de berekeningen vrij volledig te noemen. Bovendien zijn gevoeligheidsberekeningen gemaakt door verschillende parameters te variëren. De onzekerheid van de transportwaarden is echter nog erg groot (factor 2).

Bij de reconstructie van de kustlijnligging is het zeespiegelrijzingseffect niet meegenomen, wat een tekortkoming van de studie lijkt. Bij een zeespiegelstijging van 0.20 m/eeuw in een gebied van ongeveer 200 km^2 (NAP +3/-8m), is de daarmee overeenkomende volume $400.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$, wat herverdeeld wordt in de kustzone. Het proces achter het zeespiegelrijzingseffect is echter onbekend en daarom is het moeilijk aan te geven wat de effecten zijn van verwaarlozing van de relatieve zeespiegelstijging.

De bronterm bestaat uit de volumes van suppleties, storten en baggeren. Omdat de suppletievolumes de laatste jaren sterk in omvang zijn toegenomen, is het de vraag of daardoor de transporten niet zijn toegenomen in de kustzone en nog representatief zijn voor de huidige transporten. Bovendien is er mogelijk in de beschouwde periode bij Van Rijn (1964-1992) ook al sprake geweest van beïnvloeding op de transporten door suppleties, wat niet is meegenomen in het model.

Het netto windgedreven dwarstransport over de NAP +3m dieptelijn is $280.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (Van Vessem en Stolk, 1990). Deze waarden worden gerelateerd aan de breedte van het strand. In paragraaf 8.4.3.4 zal verder worden ingegaan op de transporten over de NAP +3m dieptelijn.

8.4 Vergelijking studies Stive en Van Rijn

Bij de vergelijking van de studies van Stive en van Rijn wordt vooral naar de zone tussen de NAP -8m en +3m lijn gekeken, omdat hier het meeste meetdata van bekend zijn en door Stive in de zone in dieper water geen waarden worden gegeven. In deze paragraaf vanuit de volgende fysische processen bekeken; dit zijn de processen waaruit de zandbalansen zijn opgebouwd:

- langtransport;
- dwarstransport over de -8m lijn;
- dwarstransport over de +3m lijn/ duinvoet;
- zeespiegelrijzingseffect (niet meegenomen door Van Rijn);
- brontermen: suppleties, baggeren en dumping (niet meegenomen door Stive).

8.4.1 Inhoud en opzet van de modellen

Stive geeft een waarde aan de fysische processen uit de zandbalans door deze om te zetten in een kustlijnverplaatsing voor elk proces per sectie. Van Rijn kwantificeert deze processen door per sectie langs de kust een volumeverandering te geven voor elk proces. Stive gaat uit van een vormvast profiel in de zone duinvoet/-8m. Het begrip kustlijnverplaatsing is door de invoering van een vormvast profiel niet strikt gedefinieerd en daardoor moeilijk te vergelijken met metingen van kustlijnverplaatsingen, indien het profiel niet vormvast blijkt te zijn. De benadering via de volumebalans heeft hierdoor de voorkeur boven die van de kustlijnverplaatsing. De vergelijking van beide studies zal dan ook plaatsvinden vanuit de volumeveranderingen per proces.

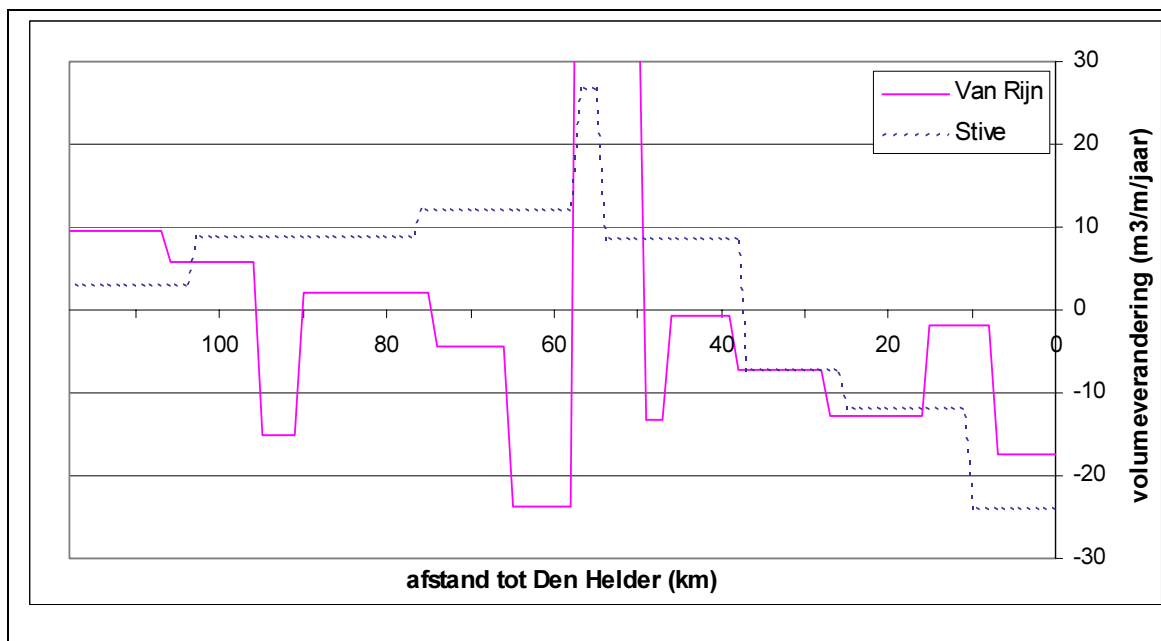
Een probleem hierbij is dat Stive en Van Rijn in hun modellen een verschillende bovengrens van het kuststelsel hebben aangenomen. De bovengrens van het beschouwde profiel is bij Stive de duinvoet en bij Van Rijn de NAP+3m lijn. Bovendien is de hoogte van het actieve profiel verschillend. Van Rijn neemt voor de hoogte van het actieve profiel een constante van 18m en bij Stive varieert deze tussen de 20 en 25m. Hierdoor ontstaat een verschil tussen beide studies van 11-39%. Aangezien de hoogte van de duinen veel variëren langs de kust, is het aannemelijk dat ook de hoogte van het actieve profiel niet constant is langs de kust. Omdat dit te compenseren wordt in de studie van Van Rijn een calibratie coëfficiënt (α_1) gebruikt. Waar echter het beste de bovengrens van het actieve systeem getrokken moet worden is onduidelijk.

Ook de systeemgrenzen in langsrichting zijn verschillend. Doordat van Rijn kleinere secties in langsrichting beschouwd komen plaatselijke variaties, ten gevolge van bijvoorbeeld de havendammen van Scheveningen of de Hondsbossche zeewering beter naar voren.

Er worden in beide modellen niet precies dezelfde processen meegenomen. Van Rijn neemt het zeespiegelrijzingseffect niet mee en in het model van Stive wordt dit wel meegenomen. In het model van Stive zijn de suppletie-, bagger-, en dumpingvolumes verwaarloosd. Deze volumes waren voor 1985 erg klein vergeleken met de huidige volumes, maar niet te verwaarlozen. Het gemiddelde suppletie volume in de periode 1965-1985 was 255.000 m³/jaar (strandsuppleties), en het huidige (2000) suppletievolume is ongeveer 3-5 Mm³/jaar. In de beschouwde periode van Van Rijn (1964-1992) was het gemiddelde suppletievolume 415.000 m³/jaar.

In bijlage 5 is de kwantificering van beide studies verder uitgewerkt. De vergelijking in de bijlage is zowel vanuit de door de verschillende processen veroorzaakte kustlijnverplaatsingen als de daarmee corresponderende volumeverandering.

8.4.2 Calibratie volumes

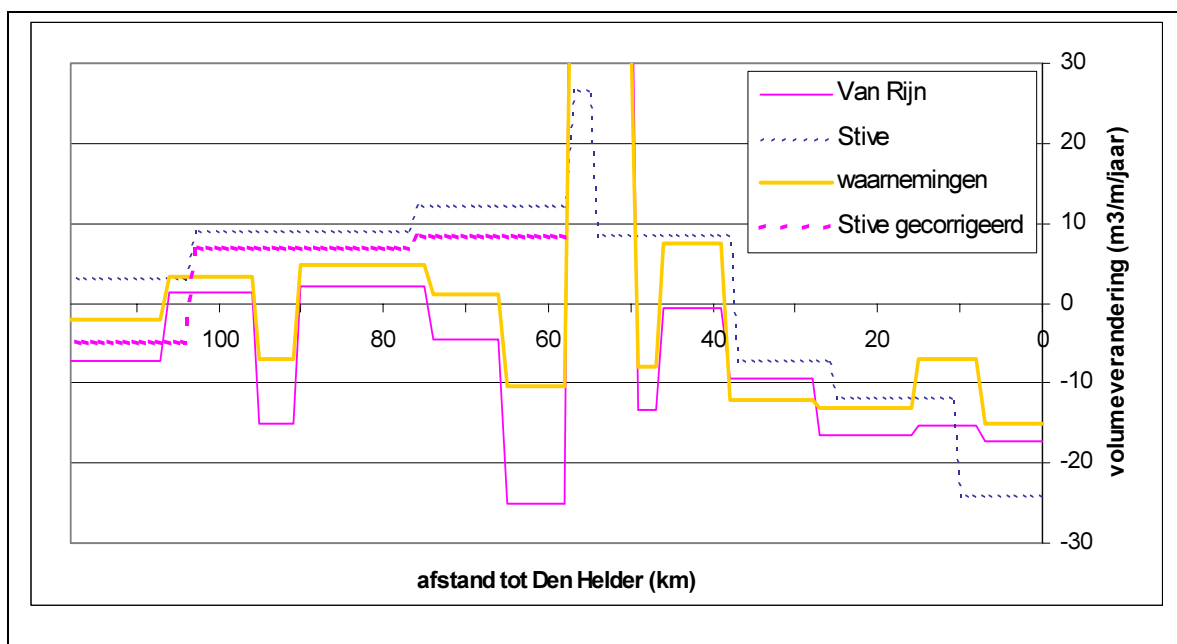


Figuur 8-5: Volumeverandering vanaf NAP -8m tot duinvoet/NAP +3m t.g.v. langtransport, dwarstransport over de +3m en -8m dieptelijn en suppleties, volgens de studies van Stive en Van Rijn

Opvallend is dat er grote verschillen zijn tussen de studies van Stive en Van Rijn, in de waarden van de volume veranderingen langs de kust (Figuur 8-5). Deze volumeveranderingen zijn gebruikt bij de calibratie van de modellen en worden daarom in de rest van dit rapport calibratie volumes genoemd. Bij de kwantificering van de calibratie volumes (kustlijnverplaatsingen bij Stive) is door Stive gebruik gemaakt van de data uit het JARKUS bestand van 1965-1985 en trendanalyses over de periode 1850-1985. Van Rijn heeft het JARKUS bestand over de periode 1964-1992 gebruikt. Ondanks dat het beschouwde JARKUS bestand qua duur maar een aantal jaar verschilt, zijn de verschillen tussen de studies aanzienlijk. De verschillen moeten daarom veroorzaakt zijn door het gebruik van trendanalyses over de periode 1850-1985 door Stive, waarvan de trend schijnbaar significant afwijkt van de trend in de periode 1964-1992.

Het verloop van de grote pieken bij IJmuiden komt niet goed naar voren in Figuur 8-5, daarom wordt verderop in deze paragraaf meer ingezoomd op de volumeveranderingen bij IJmuiden (Figuur 8-7).

Om te controleren of de volumeveranderingen overkomen met andere recentere studies is een vergelijking gemaakt met de studies van Groenendijk (1997) en Stam (1999), waarvan de waarden zijn gegeven in paragraaf 3.3 (Tabel 3-2). Met behulp van deze studies is een nieuwe schatting gemaakt van de volumeveranderingen langs de Hollandse kust; zie lijn "waarnemingen" in Figuur 8-6. Hierbij zijn dezelfde grenzen in langsricting gebruikt als in de studie van Van Rijn. De volumeveranderingen zijn eerst gecorrigeerd voor suppletievolumes. Er is ook een correctie gemaakt op de studie van Stive, voor de uitgevoerde suppleties in de periode 1965-1985. In de beschouwde periode (1965-1985) is er gemiddeld 255.000 m³/jaar op het strand gesuppleerd, waarvan 75.000 m³/jaar bij km 57, 60.000 m³/jaar bij km 100 en 120.000 m³/jaar bij km 117. Bij de correctie zijn de suppletievolumes gedeeld door de lengte van de sectie waarin de suppleties is uitgevoerd, waarna de totale volumeverandering per strekkende meter in de betrokken sectie vermindert is voor het suppletievolume per meter kust.



Figuur 8-6: Volumeverandering vanaf NAP -8m tot duinvoet/NAP +3m, exclusief suppleties, volgens de studies van Stive, Van Rijn, waarnemingen en Stive gecorrigeerd voor suppleties

Verklaring verschillen Stive in vergelijking met waarnemingen:

De relatief hoge waarden langs de Zuid-Hollandse kust kunnen deels verklaard worden doordat suppleties in het model niet zijn meegenomen. Indien deze suppletievolumes niet waren verwaarloosd, komen de volumeveranderingen een stuk dichterbij de schatting van de waarnemingen en de studie van Van Rijn (Figuur 8-6).

Op de meeste plaatsen langs de kust blijven echter grote verschillen bestaan. Een mogelijke verklaring voor deze verschillen is het gebruik van trendanalyses over de periode 1850-1985 in het model van Stive. Door een trendbreuk in de ontwikkeling van de kust, door de vele menselijke ingrepen en mogelijk een kleine verandering in de omgevingcondities, is de trendontwikkeling over de beschouwde periode niet representatief meer voor de huidige trendontwikkeling. De grootste verschillen zijn waarneembaar vanaf Hoek van Holland tot IJmuiden, waar de uitbreiding van de havendammen van IJmuiden, Hoek van Holland en Scheveningen waarschijnlijk veel invloed hebben gehad op het kustgedrag. Ten noorden van IJmuiden komen de volumeveranderingen echter wel goed overeen, alleen in de meest noordelijk gelegen sectie bij Den Helder, bestaan aanzienlijk verschillen.

Verklaring verschillen Van Rijn in vergelijking met waarnemingen:

De volumeveranderingen in de studie van Van Rijn blijken op de meeste locaties goed overeen te komen met die van andere studies (Groenendijk, 1997; Stam, 1999). Alleen bij de havendammen van Hoek van Holland, IJmuiden (km 50-60), in de secties km 47-50 en km 60-68 en in de sectie km 92-97 (ten noorden van Scheveningen) lijkt Van Rijn de volumeveranderingen verkeerd te hebben geschat. De meest waarschijnlijke verklaring voor de verschillen is dat na uitbreiding van de havendammen van IJmuiden en Scheveningen de trend in de ontwikkeling van de aanliggende kusten is veranderd, maar dat de laatste jaren de effecten langzaam zijn afgenomen, zoals bij het Kennemerstrand waarneembaar is.

Algemene verklaring verschillen:

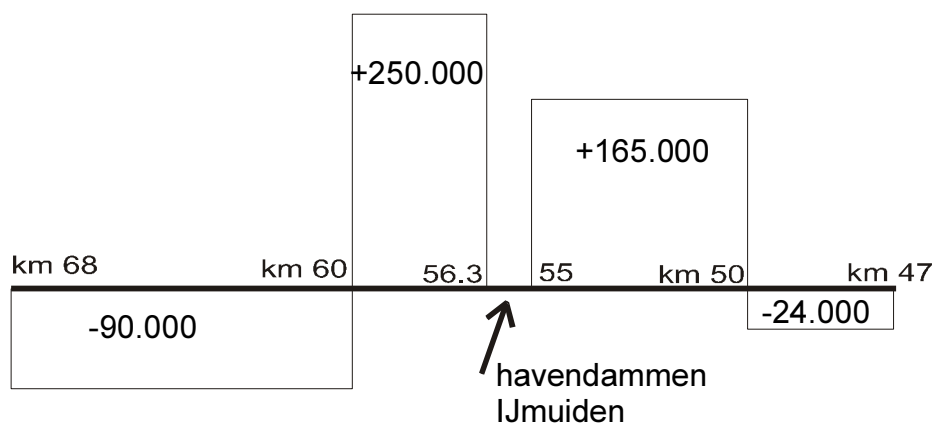
In de periode na 1960 zijn veel menselijke ingrepen uitgevoerd, zoals uitbreiding van de havendammen van IJmuiden, Scheveningen en Hoek van Holland, verdieping van de IJ-geul, uitbreiding van de Hondsbossche zeekering en aanleg van de Van Dixhoorn Driehoek. Hierdoor is mogelijk een trendbreuk opgetreden in de volumeveranderingen langs de kust in

de omgeving van deze ingrepen. Er wordt verondersteld dat de invloed van deze ingrepen in de eerste jaren het sterkste is, waarna een nieuwe evenwichtstoestand nagestreefd zal worden, waarbij het effect in de tijd langzaam afneemt. Hierdoor is in de omgeving van de havendammen van Hoek van Holland, Scheveningen en IJmuiden en bij de Hondsbossche zeekering de kustligging de eerste jaren na de aanleg (1965 tot 1985) veel verandert, maar het effect is nu mogelijk voor een groot deel verminderd.

De ligging van het Kennemerstrand (km 56-60) ondersteunt deze veronderstelling. Na de verlenging van de havendammen van IJmuiden heeft een sterke aanzanding van het Kennemerstrand (km 56-60) plaats gevonden, die veel groter was dan in de periode voor de verlenging. Deze aanzanding zet zich nog steeds voort, zij het dat de mate van aanzanding geleidelijk is afgenomen. Dit wijst erop dat na de uitbreiding van de havenhoofden de kust naar een evenwicht neigt. Er wordt verwacht dat na een verloop van tijd (ongeveer in het jaar 2025) het Kennemerstrand een evenwicht bereikt (De Kruif, Keijer, 2003). Op andere locaties waar grote civiele ingrepen zijn uitgevoerd wordt een soort gelijk kustgedrag verwacht.

IJmuiden:

Omdat de havendammen van IJmuiden een grote invloed op de kustontwikkeling blijken te hebben, maar niet duidelijk in de voorgaande figuren staan gevisualiseerd wordt hier verder ingezoomd op IJmuiden (Figuur 8-7). In de secties direct naast de havendammen vindt aanzienlijke aanzanding plaats, die ten zuiden van de havendammen groter is dan ten noorden van de dammen. In de secties aanliggend aan deze aanzandingsgebieden erodeert de kust. Stive lijkt de volumeveranderingen bij IJmuiden onderschat te hebben en Van Rijn juist overschat (Tabel 8-6).



Figuur 8-7: Erosie -en sedimentatievolumes (m³/jaar) afgeleid van Groenendijk (1997) en Stam (1999)

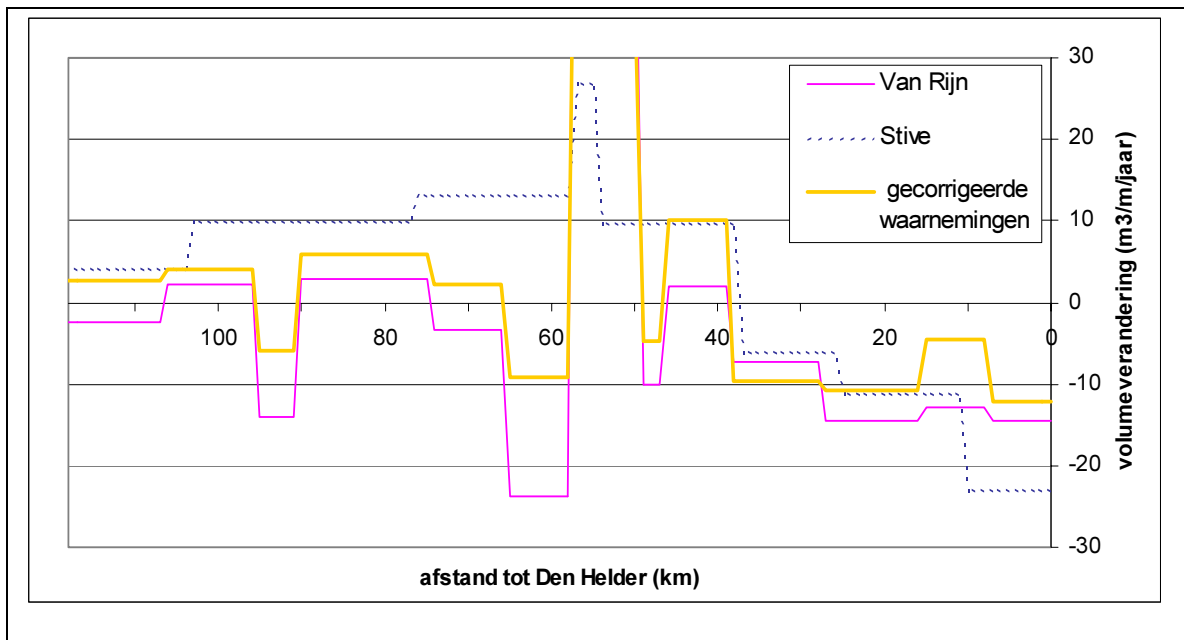
locatie	Stive		Van Rijn		waarnemingen	
volumeveranderingen calibratie gecorrigeerd voor suppleties						
50-55	+/- 18	54%	51	+155%	33	--
56.3-60	27	40%	105	+154%	68	--
volumeveranderingen t.g.v. de som van langtransport en dwarstransport over de -8m dieptelijn						
50-55	+/- 19	49%	57	+146%	39	--
56.3-60	28	37%	113	+149%	76	--

Tabel 8-6: Volumeverandering (m³/m/jaar) volgens Stive, Van Rijn en waarnemingen bij IJmuiden, en percentage van volumeverandering waarnemingen (alle gecorrigeerd voor suppleties)

Volumeveranderingen t.g.v. de som van langtransport en dwarstransport over de -8m dieptelijn:

In Figuur 8-8 zijn de volumeveranderingen ten gevolge van de som van gradiënten in het dwarstransport over de -8m dieptelijn en het langtransport verwerkt. De lijn "gecorrigeerde waarnemingen" is tot stand gekomen via een bewerking van de lijn "waarnemingen" uit Figuur 8-6. Daarbij is dezelfde correctie uitgevoerd voor het volume van het dwarstransport over de +3m lijn als in de studie van Van Rijn, dat varieerde van 1 tot 8 m³/m/jaar.

Het langtransport en het dwarstransport over de NAP -8m dieptelijn bepalen voor het grootste deel de kustontwikkeling volgens Stive en Van Rijn (vergelijk Figuur 8-6 en Figuur 8-8). Volgens Van Rijn is echter alleen bij de havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden het dwarstransport dominant en wordt het overige deel van de Hollandse kust vooral gedomineerd door gradiënten in het langtransport. Volgens Stive wordt de kustontwikkeling ten zuiden van Egmond (km 37) gedomineerd door het dwarstransport en ten noorden van IJmuiden door gradiënten in het langtransport (zie bijlage 5 en 6). Uitzondering hierop is de sectie direct ten noorden van de havendammen van Hoek van Holland, die zowel door het dwars- als langtransport wordt gedomineerd en de secties direct aanliggend aan de havendammen van IJmuiden, die door langtransport worden gedomineerd.



Figuur 8-8: Volumeverandering vanaf NAP -8m tot duinvoet/NAP +3m t.g.v. de som van langtransport en dwarstransport over de -8m dieptelijn, volgens de studies van Stive, Van Rijn en gecorrigeerde waarnemingen

Het effect van dwarstransport over de NAP +3m lijn en het zeespiegelrijzingseffect blijken veel minder effect op het kustgedrag te hebben dan het langtransport en het dwarstransport over de NAP -8m dieptelijn, maar zijn zeker niet verwaarloosbaar (zie bijlage 5 en 6). In de eerste plaats zal daarom verder ingegaan worden op het langtransport en dwarstransport op 8m diepte. Daarna volgt een korte analyse van het dwarstransport over de +3m lijn, het zeespiegelrijzingseffect en effecten door suppleties.

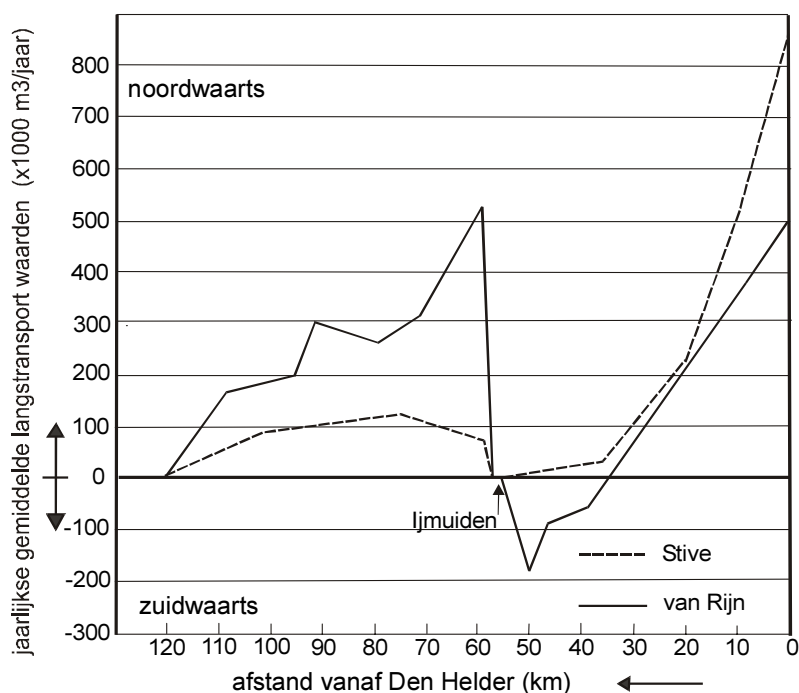
Duidelijk is dat er grote verschillen tussen beide studies zijn ontstaan door verschillen in de calibratie volumes. Bovendien bestaan er ook aanzienlijke verschillen tussen de calibratie volumes van de studies van Stive en van Rijn en meer recentere studies. Aangezien met behulp van deze data de transporten worden bepaald, is de onzekerheid van de transporten nog een factor groter.

8.4.3 Processen

8.4.3.1 Langtransport

Er zitten grote verschillen tussen de langtransport waarden van beide studies (zie Figuur 8-9). Aan beide zijden van de havendammen is een heel verschillend beeld te zien. Ten zuiden van de havendammen van IJmuiden laat Van Rijn grotere langtransport waarden dan Stive zien, terwijl ten noorden van de havendammen Stive juist hogere waarden geeft.

Het langtransport wordt steeds groter richting Den Helder bij beide studies, dat volgens Stive vanaf km 35 tot Den Helder wordt veroorzaakt door de zandimporterende capaciteit van het Marsdiep. Volgens Van Rijn wordt deze toename in de sectie van km 15-40 veroorzaakt door de grotere profielsteilheid, en groter wordende getij-asymmetrie, en in mindere mate door de grotere golfaanval in het noorden. De aanwezige zandbanken en de aanwezigheid van strandhoofden lijken ook een belangrijk effect op het langtransport te hebben. Vanaf km 15 tot Den Helder wordt door Van Rijn ook het Marsdiep als verklaring voor de toename van het langtransport gegeven samen met by-passing door convergentie van de stroming. Het eroderende zand van de aanliggende kust gaat volgens beide studies grotendeels verloren aan het Marsdiep estuarium.



Figuur 8-9: Vergelijking langtransport (m³/jaar) Stive en Van Rijn

Het netto noordwaartse langtransport (in de zone -8m/+3m) bij Den Helder is volgens Van Rijn 500.000 m³/jaar en volgens Stive 875.000 m³/jaar. Indien je de kustlijnverplaatsing in plaats van de volumeveranderingen door het langtransport vergelijkt wordt het verschil tussen de studies alleen maar groter (bijlage 5).

Direct ten noorden van de havendammen van IJmuiden heerst volgens van Rijn een zuidwaarts langtransport, Stive geeft hier echter een gering noordwaarts transport. Het netto zuidwaartse transport zou veroorzaakt worden door de afscherming van de golven uit het zuidwesten, door de havendammen van IJmuiden en de werking van de IJ-geul als zandput. Dit is zeer aannemelijk te noemen. Direct ten noorden van Hoek van Holland is een soort gelijke situatie door de daar aanwezige havendammen. Daar is van afscherming van de golven echter weinig terug te vinden in de langtransport waarden van beide studies. Dit is

vreemd, vooral omdat de havendammen bij Hoek van Holland nog een stuk langer dan bij IJmuiden zijn (4.2 km t.o.v. 2.3 km). Mogelijk is de beïnvloeding door de kustlijnoriëntatie hier van groot belang. Het langstransport wordt bij Hoek van Holland op nul gesteld, door de blokkerende werking van de havendammen en omdat wordt aangenomen dat de Euro-geul als zandput werkt, waar al het zand in bezinkt.

Ten zuiden van IJmuiden zijn de kwantitatieve verschillen tussen de studies een stuk groter dan ten noorden van IJmuiden. Als je de kustlijnverplaatsing per sectie vergelijkt i.p.v. de volumeveranderingen worden de verschillen tussen beide studies iets kleiner. Echter blijven er vooral richting IJmuiden grote verschillen bestaan. Van Rijn verklaart de grote langstransport waarden direct ten zuiden van IJmuiden door de afscherming van de golven uit het noorden door de havendammen van IJmuiden.

De grote verschillen tussen de studies kan allerlei oorzaken hebben. Eén van de belangrijkste oorzaken is waarschijnlijk ontstaan door de grote verschillen in de calibratie volumes langs de kust tussen beide studies, zoals besproken in paragraaf 8.4.2.

Een van de mogelijke andere oorzaken is het gebruik van verschillende transportformules. Stive gebruikte de transportformule van Bailard en Van Rijn gebruikte voor het suspensie transport Van Rijn en voor het bodemtransport Ribberink (bijlage 3).

De grote verschillen tussen beide modeluitkomsten kunnen ook deels verklaard worden door het gebruik van een verschillend golfklimaat in de modellen. Stive gebruikte het golfklimaat van 1980-1988, gebaseerd op een constante golfrichting voor alle golfhoogten voor iedere (wind) richtingssector. Van Rijn nam in zijn model het golfklimaat van 1980-1993, waarin de golfrichting varieerde met de golfhoogte klasse. Het golfklimaat van 1980-1988 laat in vergelijking tot het golfklimaat van 1980-1993 minder golven uit zuidwestelijke en iets frequenter golven uit noordwestelijke richting zien. Dit kan deels de grotere langstransport waarden Van Rijn t.o.v. Stive verklaren in de zuidelijke secties. Volgens Van Rijn geeft het gebruik van het golfklimaat van 1980-1988 in plaats van 1980-1993, een vermindering in het netto langstransport van ca. 20% op km 14, 76 en 103 en zelfs 40% op km 40.

8.4.3.2 Dwarstransport over de -8m en -20m lijn

Volgens Van Rijn is het netto dwarstransport over de -20m dieptelijn 0-15 m³/m/jaar in kustwaartse richting (met een variatie van ±10 m³/m/jaar). Stive geeft een waarde van 1-3 m³/m/jaar. Het netto dwarstransport op de -8m dieptelijn is volgens Van Rijn 0 m³/m/jaar (met een variatie van ±10 m³/m/jaar), waarbij Stive een waarde van 10-12 m³/m/jaar geeft (zie Figuur 8-10).

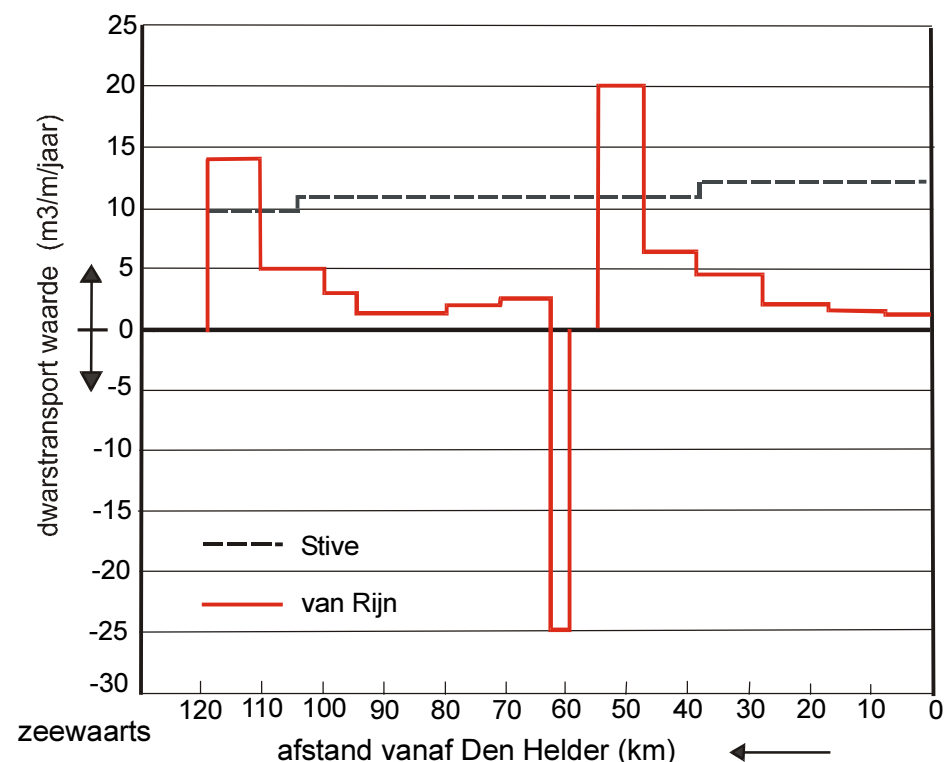
Van Rijn geeft voor het totale netto kustwaarts gerichte dwarstransport over de -8m dieptelijn een waarde van 490.000 m³/jaar. Stive geeft hiervoor een waarde van 1.215.000 m³/jaar. Van Rijn gebruikt voor het totale dwarstransport over de -8m dieptelijn het sluitingsvolume van de massabalans in zijn model. Stive gebruikt hiervoor de waarden volgend uit het fysisch-mathematische model.

Stive geeft langs de gehele Hollandse kust een redelijk constant dwarstransport, in tegenstelling tot de waarden van Van Rijn, die veel variëren langs de kust. Volgens Stive is het dwarstransport voornamelijk golf gedomineerd en sterk afhankelijk van de waterdiepte. Volgens Van Rijn wordt het dwarstransport echter gedomineerd door getijgedreven, windgedreven en dichtheidsgedreven stromingen in combinatie met het losmakende effect door golfbewegingen. De dichtheidsgedreven stromingen zouden van Hoek van Holland tot enkele tientallen kilometers noordwaarts dominerend zijn voor het netto dwarstransport. In het model van Stive zijn de stromingen ten gevolge van dichtheidsgradiënten en

windgedreven stromingen niet meegenomen, waardoor de dwarstransport waarden vrij constant zijn in het model.

Het effect van de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland op het dwarstransport in de aanliggende kustsecties (over een afstand van ca. 5km) is volgens Van Rijn aanzienlijk. Van Rijn relateert het dwarstransport bij IJmuiden aan de dominante vloedstroming die versnelt ten zuiden van de havendammen en een zeewaarts transport oplevert en ten noorden van de havendammen vertraagd en daar een kustwaarts transport oplevert. Volgens Van Rijn is bij de havendammen het getij stromingsgerelateerde transport dominant boven het golfgerelateerde transport.

landwaarts

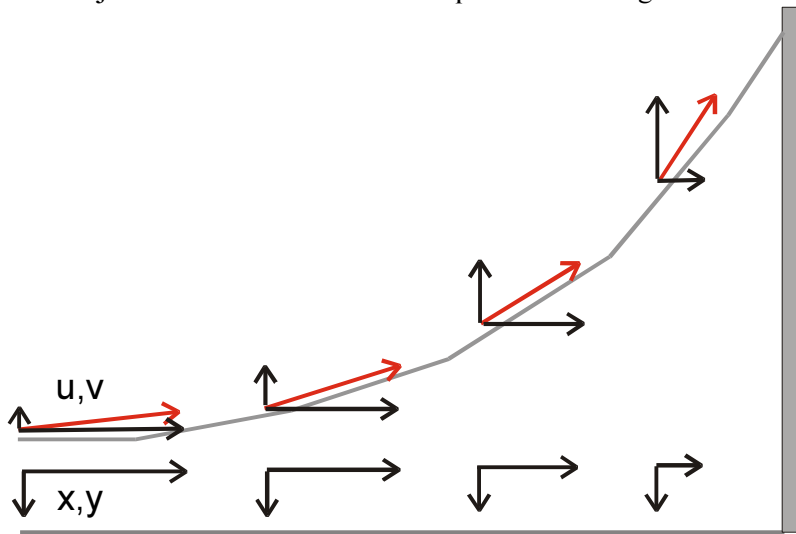


Figuur 8-10: Vergelijking dwarstransport ($m^3/m/jaar$) over de -8m dieptelijn van Stive en Van Rijn

In feite is het niet helemaal eerlijk om de dwarstransporten van Stive en van Rijn met elkaar te vergelijken. Stive neemt namelijk alleen dwarsgerichte stromingsprocessen mee, zoals golfasymmetrie en brandingsretourstroming. Van Rijn neemt daarnaast ook de dwarsgerichte componenten van langstransport processen mee, zoals de transporten die ontstaan door convergentie en divergentie van de getijdenstroming om de havendammen. Hierdoor ontstaan de pieken in het dwarstransport bij de havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden (zie Figuur 8-11).

Het langs -en dwarstransport worden in de studie van Van Rijn gescheiden door middel van een u en een v-component (meebewegend assenstelsel), omdat de kustlijnoriëntatie bijvoorbeeld bij de havendammen van IJmuiden, (over zeer korte afstand) van richting verandert. Indien er een vast assenstelsel (x,y) beschouwd wordt, ontstaan er een heel ander beeld bij de havendammen, waarbij het dwarstransport geleidelijk toeneemt richting de havendammen (noordwaarts) en het langstransport geleidelijk afneemt, in plaats van één grote sprong te maken bij IJmuiden. In feite ontstaan er richting de havendammen dwars gerichte langstransport componenten, waardoor het langs -en dwarstransport moeilijk te scheiden worden. De definitie van het langs -en dwarstransport is daarom erg belangrijk, vooral als er

een sterke kustkromming en/of obstakels langs de kust aanwezig zijn. In de rest van deze studie zal bij voorkeur een u en een v-component worden gebruikt.



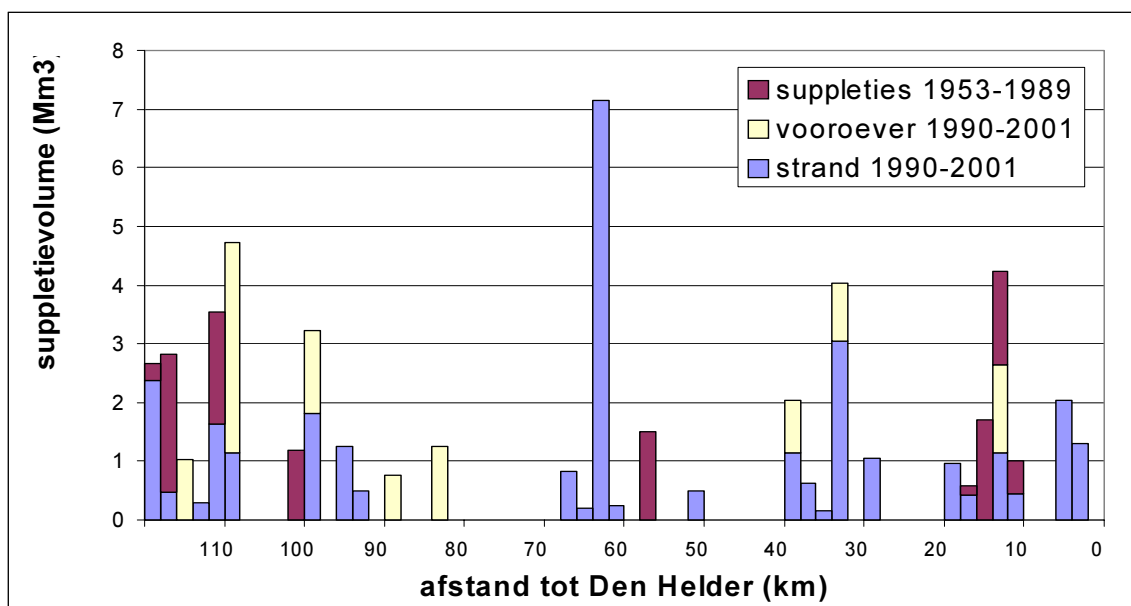
Figuur 8-11: Effect van vast assenstelsel (component x,y) en meebewegend assenstelsel (component u,v) op transportcomponenten

De verschillen in het verloop van het dwarstransport tussen beide studies zijn dus in feite niet groot. Beide studies geven een redelijk constant kustwaarts gericht transport. Bij de havendammen zijn er wel grote verschillen, maar deze worden veroorzaakt door een verschillende definitie van het dwarstransport. Kwantitatief zijn de verschillen wel groot, waarbij de waarden met een factor 3-4 ($5-10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) van elkaar verschillen op de meeste locaties.

8.4.3.3 Brontermen

Onder brontermen worden suppleties, storten en baggeren van sediment verstaan. Van Rijn neemt deze volumes mee in zijn model door per sectie een totaal volume aan brontermen te geven. De totale volumeverandering in de zone $-8/+3\text{m}$ is volgens Van Rijn $415.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ positief (in de beschouwde periode 1964-1992). In het model van Stive zitten de volumes van de suppleties, storten en baggeren niet verwerkt, waardoor op een aantal locaties (km 57, 100 en 117) het model minder nauwkeurig is. Daarentegen waren de suppletie hoeveelheden voor de begin jaren 90 een stuk kleiner dan de huidige waarden (Figuur 8-12), waardoor de foutenmarge klein is. Het gemiddelde suppletie volume in de beschouwde periode (1965-1985) in de studie van Stive was $255.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

Omdat de suppletievolumes de laatste jaren sterk in omvang zijn toegenomen, is het de vraag of daardoor de transporten in de kustzone niet zijn veranderd, omdat het systeem verder uit zijn evenwichtstoestand wordt gehaald. Verondersteld wordt dat de eerste jaren na 1990 het effect van de suppleties op het gedrag van de kust nog niet zo groot is, maar in de jaren daarna zal toenemen, door een grotere totale input van sediment in het kuststelsel. De gemiddelde suppletie behoefte van de Hollandse kust voor de periode 2000-2040 is geschat op $4.3 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (Mulder, 2000). Hierbij worden eerst de verliezen in de ondiepe zone gecompenseerd en indien de resterende zandbalans van het deelsysteem een negatief saldo blijft houden wordt dit verlies ook gecompenseerd.



Figuur 8-12: Overzicht suppletievolumes Hollandse kust over de periode voor en na 1990 (uitgezonderd de 19 Mm³ van de van Dixhoorn Driehoek)

8.4.3.4 Dwarstransport over de +3m lijn/ duinvoet

Van Rijn neemt voor het netto windgedreven dwarstransport over de NAP +3m dieptelijn een totale waarde aan van 280.000 m³/jaar (Van Vessem en Stolk, 1990). Relatief grote sedimenttransportwaarden van 4-6 m³/m/jaar komen voor bij brede stranden (in aanzandingsgebieden bij havendammen), in de andere zones wordt een kleinere waarde aangenomen van 1-3 m³/m/jaar genomen. Stive neemt een constante waarde van 1 m³/m/jaar aan en komt daarmee uit op een totaal dwarstransport van 109.000 m³/jaar langs de gehele Hollandse kust. Deze waarde is erg laag vergeleken met die van Van Rijn.

Volgens de Ruig (1989) is het totale netto windgedreven dwarstransport over de NAP +3m dieptelijn nog groter dan in de studie van Van Rijn, met een waarde van 480.000 m³/jaar (4.0 m³/m/jaar). Uit de studie van De Ruig en Louisse (1991) volgt een netto windgedreven dwarstransport van 3.0-3.5 m³/m/jaar, met uitschieters tot 10 m³/m/jaar in aanzandingsgebieden, zoals bij de havendammen van IJmuiden.

In de studie van Van der Wal (1999) is het effect van strandsuppleties op het sedimenttransport vanaf het strand naar de duinen onderzocht. Daaruit bleek dat een jaar na het aanbrengen van een suppletie de erosie van het strand aanzienlijk toeneemt. Er is een aanstuiving gemeten van gemiddeld 14 m³/m/jaar, tegenover gemiddeld 9 m³/m/jaar in jaren zonder invloed van een strandsuppletie. Een deel van het sediment verplaatst zich echter terug naar het strand gedurende stormomstandigheden, de omvang hiervan wordt echter niet genoemd. De ruimtelijke en temporele variatie in aanstuiving was erg groot.

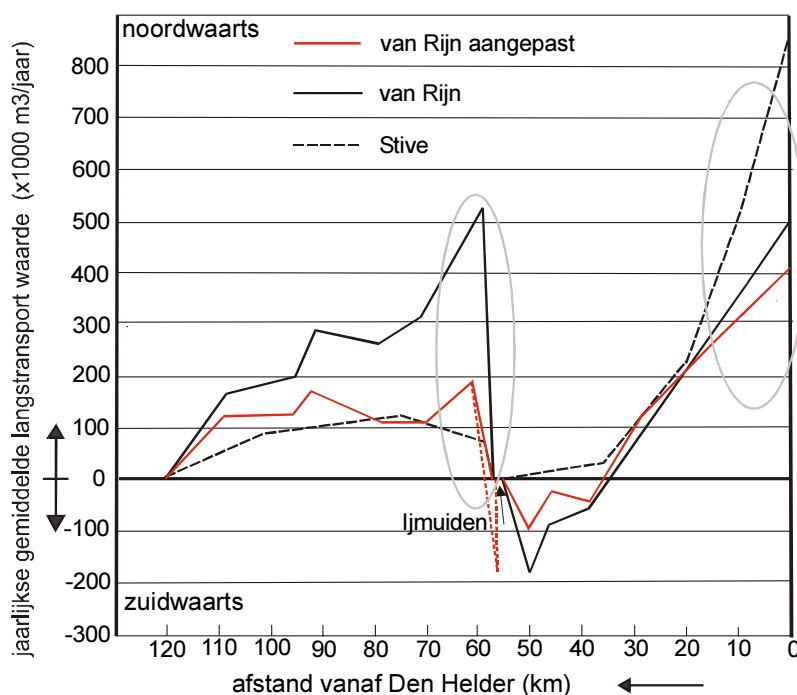
De omvang van het netto windgedreven dwarstransport over de NAP +3m dieptelijn varieert aanzienlijk volgens de verschillende studies, met waarden vanaf 100.000 m³/jaar (1 m³/m/jaar) tot 480.000 m³/jaar (4 m³/m/jaar). Duidelijk is echter dat het windgedreven dwarstransport niet constant is langs de Hollandse kust. Dit lijkt voornamelijk veroorzaakt te worden door de variërende strand -en duinbreedte en de oriëntatie van duinen ten opzichte van de windrichting (Van der Wal, 1999).

8.5 Aanpassing langtransport waarden van Rijn

afstand tot Den Helder (km)		Van Rijn (gradiënt)			waarnemingen langs + dwars (gradiënt)	verschil	van Rijn aangepast	
		langs	dwars	langs + dwars			langs	langs (*10 ³ m ³ /km/jaar)
0	7.2	-15.97	1.39	-14.58	-12.22	-2.36	-13.61	-98
7.2	15.35	-14.72	1.84	-12.88	-4.55	-8.33	-6.39	-52
15.35	27.1	-16.60	2.13	-14.47	-10.87	-3.60	-13.00	-153
27.1	38.1	-11.82	4.55	-7.27	-9.73	2.46	-14.28	-157
38.1	46.1	-4.38	6.25	1.88	10.00	-8.13	3.75	30
46.1	49.1	-30.00	20.00	-10.00	-4.67	-5.33	-24.67	-74
49.1	54.1	37.00	20.00	57.00	39.00	18.00	19.00	95
54.1	57.85	138.67	-25.33	113.33	76.00	37.33	101.33	380
57.85	65.85	-26.25	2.50	-23.75	-9.25	-14.50	-11.75	-94
65.85	74.85	-5.56	2.22	-3.33	2.31	-5.64	0.09	1
74.85	89.85	1.67	1.33	3.00	5.80	-2.80	4.47	67
89.85	94.85	-17.00	3.00	-14.00	-6.00	-8.00	-9.00	-45
94.85	105.9	-2.27	4.55	2.27	4.10	-1.83	-0.45	-5
105.9	116.4	-16.67	14.29	-2.38	2.76	-5.14	-11.53	-121

Tabel 8-7: Gradiënten in langs -en dwarstransport (m³/m/jaar) volgens Van Rijn en aangepaste waarden langtransport Van Rijn; negatieve gradiënten veroorzaken erosie

De waarden van de calibratie volumes in de studies van Stive en van Rijn wijken aanzienlijk af van de waarden uit recentere studies (Groenendijk, 1997; Stam, 1999, zie paragraaf 8.4.2). Het gebruik van andere calibratie volumes geeft logischerwijs ook andere transport waarden. Om dit effect te bekijken worden het langs -en dwarstransport uit de studie van Van Rijn aangepast aan de recentere calibratie volumes, die volgen uit JARKUS meetgegevens. Hierbij is voor aanpassing van de studie van Van Rijn gekozen, omdat de calibratie volumes iets beter overeen komen met de recentere studies en vanwege de meer gedetailleerde onderverdeling van secties in langsrichting.



Figuur 8-13: Vergelijking jaarlijkse netto gemiddelde langtransport (*10³ m³/jaar) in de brandingszone volgens Stive, Van Rijn en aangepaste langtransport waarden van Van Rijn; de ovalen geven de gebieden aan waar het langs -en dwarstransport niet meer strikt te scheiden zijn

De verschillen in calibratie volumes tussen de studie van Van Rijn en recentere meetdata kunnen waarschijnlijk verklaard worden doordat het effect van uitbreiding van de havendammen op de kustontwikkeling is afgenomen (zie paragraaf 8.4.2). Er wordt verondersteld dat door de uitbreiding van de havendammen en de effecten in de periode na de aanleg, vooral de langtransport gradiënten beïnvloed zijn en het dwarstransport weinig invloed heeft ondervonden. Alleen in de secties aanliggend aan de havendammen is het dwarstransport waarschijnlijk beïnvloed. Indien er in eerste instantie vanuit gegaan wordt dat de uitbreiding van de havendammen alleen effect heeft op het langtransport, dan veranderen de langtransport gradiënten in de waarden, zoals aangegeven in de laatste twee kolommen in Tabel 8-7. Met deze gradiënten kan vervolgens het langtransport ook kwantitatief uitgerekend worden langs de gehele Hollandse kust (Figuur 8-13).

Door deze aanpassing komt de gecorrigeerde studie van Van Rijn langs de Zuid-Hollandse kust vrijwel op de lijn uit de studie van Stive te liggen. In de studie van Van Rijn lijkt hier dus het langtransport aanzienlijk overschat te zijn. Langs de Noord-Hollandse kust blijven echter grote verschillen bestaan.

Bij de berekening is er van zuid naar noord gerekend. Het netto langtransport bij de havendammen van Hoek van Holland wordt nul verondersteld. Het langs -en dwarstransport worden in dit geval gescheiden door middel van een u en een v-component (meebewegend assen-stelsel), omdat de kustlijnoriëntatie van richting verandert (zie paragraaf 8.4.3.2).

Er ontstaat echter een negatieve sprong bij de havendammen van IJmuiden in het langtransport van $183.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (Figuur 8-13) om het volume sluitend te maken, wat niet mogelijk is. Waarschijnlijk wordt dit deel door het dwarstransport gecompenseerd richting de havendammen.

9 Langs -en dwarstransport

9.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het langstransport in de zone NAP +3m tot -8m en het dwarstransport over de -8m dieptelijne geanalyseerd. Daarbij wordt eerst de transportwaarden uit de studies van Stive en Van Rijn vergeleken met de waarden uit andere studies. Daarna wordt met behulp van gevoeligheidsberekeningen bekeken, wat de belangrijkste processen en parameters zijn, die de transporten beïnvloeden. Vervolgens wordt het huidige beeld gevormd van de transporten langs de Hollandse kust.

De Hollandse kust is onder te verdelen in 5 secties met verschillend kustgedrag (Wijnberg, 2002, zie paragraaf 3.5). De grenzen van deze gebieden worden verklaard door de aanwezigheid van civiele constructies en de offshore bathymetrie, zoals bij km 8 door de buitendelta. De andere grenzen worden gevormd door de Hondsbossche zeevering (km 25), de havendammen van IJmuiden (km 56) en door een strook met, en één zonder strandhoofden samen met de havendammen van Scheveningen (km 98). De gebieden onderscheiden zich door een verschillend bankengedrag, kusterosie of sedimentatie, en/of verschillende steilheden van het profiel.

Naast het kustgedrag wordt het langstransport langs de Hollandse kust vrijwel over de gehele lengte beïnvloed door de aanwezige constructies (zie bijlage 8). De invloed op het dwarstransport lijkt over een veel kleinere afstand in langsrichting aanwezig te zijn, maar wordt verondersteld op dezelfde gebiedsgrenzen (havendammen, Hondsbossche zeevering, strandhoofden en buitendelta) wel in meer of minder mate invloed te ondervinden van de constructies en bathymetrie. De gebieden met verschillend kustgedrag onderscheiden zich echter voornamelijk door gedragverschillen met typisch dwarstransport gerelateerde kenmerken, zoals bankengedrag en fluctuaties in steilheden van het profiel. De aanwezige constructies lijken dus wel het langstransport en kustgedrag langs de gehele Hollandse kust te beïnvloeden, maar niet het netto dwarstransport. De bruto dwarstransporten zouden echter aanzienlijk kunnen verschillen tussen de te onderscheiden gebieden.

9.2 Overzicht langstransport uit andere studies

De studies van Stive en Van Rijn geven geen eenduidig beeld van het langs -en dwarstransport langs de Hollandse kust. Bovendien zijn deze studies al zo'n 10-15 jaar oud. Daarom worden het langs -en dwarstransport vergeleken met de waarden uit recentere studies (PonTos, 1999; Roelvink, 2001), waarin de nieuwste inzichten zitten. Nadeel van het PonTos model (1999) is dat voor de input en calibratie van het model grotendeels de waarden van Van Rijn zijn gebruikt, waardoor het model geen onafhankelijke uitkomsten geeft. De gebruikte waarden uit het PonTos model komen uit 1999, maar het model wordt nog verder ontwikkeld, zodat in deze studie de inzichten tot 2003 zijn gebruikt.

PonTos (Steetzel, 1999):

Het PonTos-model is een multi-lijnen model, waarin het dwarsprofiel is geschematiseerd als vijf onderlinge gekoppelde horizontale lagen. Fysische processen (zoals dwars -en langstransport) zijn in parametrische relaties ondergebracht. Aangestuurd door de hydraulische condities (golven, getij en gemiddelde waterstanden) levert het model een morfologische ontwikkeling van een kustprofiel als resultaat. Het model is toegepast voor de kustsectie vanaf Hoek van Holland tot Callantsoog en in meer detail voor de kustsectie IJmuiden. In het model worden kleinere constructies langs de kust (in dwarsrichting), zoals strandhoofden en de Hondsbossche zeevering verwaarloosd.

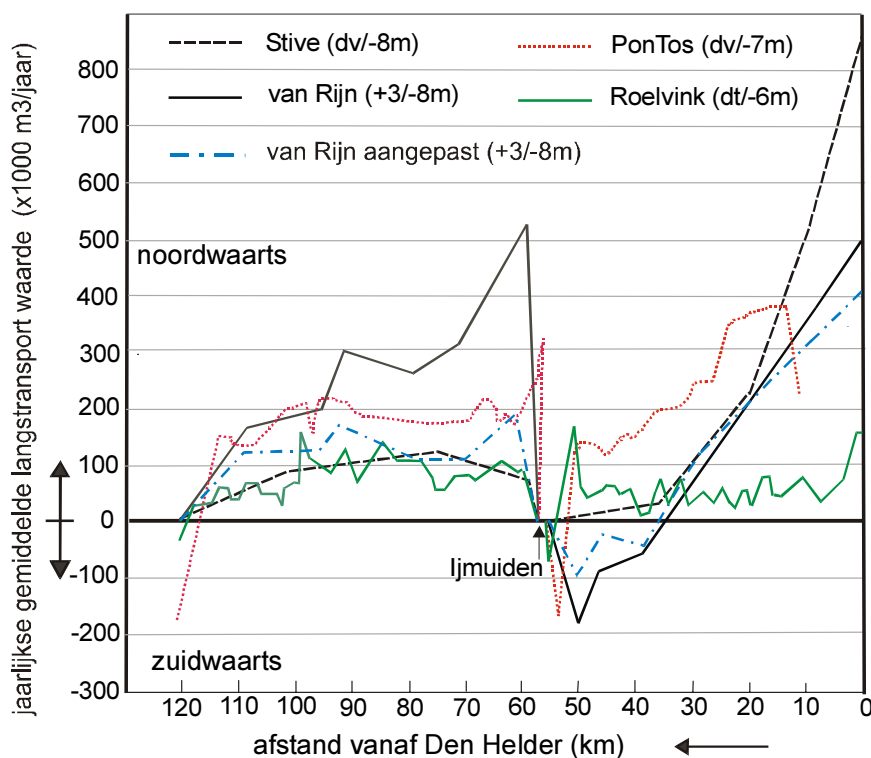
Voor de calibratie is hoofdzakelijk gebruik gemaakt van de studie van Van Rijn (1995), aangevuld met gegevens uit de studies van Stam (1999) en Boutmy (1998). Input gegevens voor het model zijn afgeleid uit de studie van Van Rijn (1995). Er zijn geen berekeningen

gemaakt met windgedreven stromingen toegevoegd aan de getij gedreven stromingen. Bij de calibratie is het netto golfgedreven en getijgedreven transport van km 56 tot km 9 vermenigvuldigd met een factor 1 bij km 56 tot 1.5 bij km 9. De lengte waarover de havendammen van IJmuiden de stroming beïnvloedt, is gezet op 5 maal de lengte van de havendammen (ongeveer 15 km). Het langtransport is berekend binnen de grenzen van de duinvoet en de NAP -7m dieptelijn.

Roelvink (Mare, 2001):

Berekeningen zijn gemaakt met Delft3D, waarbij voor de calibratie de JARKUS data uit de periode 1972-1980 in de zone vanaf de duintop tot NAP-6m zijn gebruikt. De berekende waarden van het langtransport zijn met een factor 2 gehalveerd langs de gehele Hollandse kust bij de calibratie van het model. In de secties waar strandhoofden aanwezig zijn (km 2-31 en km 98-118) zijn de berekende transporten nog eens gehalveerd (dus 25% van de berekende waarden), om het blokkerende effect van de strandhoofden te compenseren. Dwartransport is niet direct in het model verwerkt.

Door de korte periode (1972-1980) die bij de calibratie is gebruikt, zijn deze waarden vrij onzeker. Langs de Noord-Hollandse kust heeft bijvoorbeeld in deze periode relatief weinig erosie plaats gevonden, in vergelijking met langere periodes in de andere studies (Stive, van Rijn, Stam). Hierdoor zijn de waarden van het langtransport in deze sectie waarschijnlijk onderschat. De verwaarlozing van het dwartransport is een mogelijke verklaring voor de relatief lage langtransport waarden langs de gehele kust, indien het netto dwartransport kustwaarts is, zoals in de studies van Stive en van Rijn. Opvallend is de grote overeenkomst tussen de waarden langs de Zuid-Hollandse kust voor de studies van Roelvink en Stive.



Figuur 9-1: Jaarlijks gemiddelde langtransport waarden (m^3/jaar) in de brandingszone volgens verschillende studies en huidige studie

Langs de Zuid-Hollandse kust komen de langtransport waarden van de verschillende studies redelijk overeen (Figuur 9-1). Van Rijn lijkt echter het langtransport tussen Scheveningen (km 100) en de havendammen van IJmuiden (km 56) overschat te hebben. Mogelijk zijn de waarden uit de studie van Van Rijn kwantitatief wel correct, maar dan moet het netto

dwarstransport over de -8m dieptelijn zeewaarts gericht zijn. Dit is echter niet waarschijnlijk, omdat het dwarstransport in vrijwel alle andere studies (Stive, 1989; Bakker et al, 1989; Steetzel, 2001) landwaarts wordt verondersteld.

Ten noorden van IJmuiden zijn de verschillen veel groter. Alle studies uitgezonderd de studie van Stive geven ten noorden van de havendammen van IJmuiden een zuidwaarts transport, echter over zeer verschillende afstanden.

In de sectie vanaf Egmond (km 40) tot Den Helder geven alle studies behalve die van Roelvink een sterk oplopend verloop van het langstransport. Kwantitatief verschillen de waarden echter erg veel. Opvallend is dat er bij het calibreren van de modellen van de verschillende studies, in deze sectie allerlei kunstgrepen uitgevoerd moeten worden, om het langstransport een sterk oplopend verloop te geven.

9.3 Processen die het langstransport beïnvloeden

9.3.1 Gevoeligheidsberekeningen

De gevoeligheidsberekeningen in de verscheidene studies zijn meer bedoeld om de gevoeligheid van verschillende processen te bepalen, dan de precieze verdeling van de transporten langs de kust. De waarden uit de basis berekeningen geven niet de daadwerkelijk optredende transporten weer, omdat de berekeningen nog gecorrigeerd moeten worden voor aanwezigheid van constructies.

Uit de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn (1995) volgt dat het langstransport in de brandingszone (NAP -8/+3m) het meeste wordt beïnvloed door:

- het golfklimaat (en de daarmee samenhangende kustlijnoriëntatie);
- de dieptegemiddelde langsstroming;
- de aanwezigheid van brekerbanken;
- de bodemhelling;
- de korreldiameter.

Daarnaast zijn de bijdrage van de windgedreven en getijgedreven transporten belangrijk, maar echter in mindere mate dan het golfgedreven transport. Dit komt doordat het grootste deel van het langstransport dicht bij de kust plaatsvindt, waar de getij -en windgedreven stromingen relatief klein zijn. Verwaarlozing hiervan levert een vermindering van het langstransport op van slechts 20% in de brandingszone.

De aanwezigheid van *brekerbanken* geeft een vermeerdering van het langstransport met 50-60% in de profielen 40 en 76 en in de profielen 14 en 103 (afstand tot Den Helder) is het effect 10-20%, doordat alleen kleine banken aanwezig zijn. Bij een vermeerdering van de *bodemhelling* van 0.005 naar 0.01 vermeerderd het langstransport met een factor 2. Dit komt doordat de golven intensiever breken vlakbij de kust, wat grotere golfgedreven stroomsnelheden en transportwaarden geeft. Een vermindering van de *korreldiameter* van 250 naar 200 μm geeft een vermeerdering van het langstransport met 60%.

Volgens Van Rijn zijn de transporten richting het noorden een factor 2 tot 3 groter dan de transporten richting het zuiden. Ongeveer 60-70% van het totale geïntegreerde langstransport in de zone vanaf NAP -8 tot +3m, vindt plaats in de inner surfzone met een breedte van ongeveer 200m. Op alle locaties in langsrichting op 8m diepte is het suspensie transport dominant over het bodemtransport.

Langtransport over de -8m dieptelijn:

NAP -8m	afstand tot Den Helder			
	103	76	40	14
gevoeligheidsberekening				
basis berekening	58.3	62.5	138.0	99.2
10 % grotere ebsnelheden	46.5	46.0	113.0	77.0
geen wind effecten	26.0	23.3	34.3	39.7
geen dichtheidsgradiënten	57.5	61.2	137.8	99.3
vermindering van retourstroming (-50%)	51.3	57.7	130.3	90.8
geen lange golven	60.2	66.3	137.8	99.8
10 % kleinere korreldiameters	--	93.5	--	--
10 % grotere korreldiameters	--	52.5	--	--
beste schatting Van Rijn	65+/-40	85+/-50	135+/-50	150+/-60

Tabel 9-1: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde langtransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -8m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is noordwaarts (Van Rijn, 1995)

Het langtransport op de -8m dieptelijn varieert volgens de gevoeligheidsberekeningen aanzienlijk, maar de ondergrens wordt echter meestal bepaald door verminderde getij snelheden en geen windeffecten (Tabel 9-1). De bovengrens is gerelateerd aan relatief fijn sediment. De beste schatting van Van Rijn moet beschouwd worden als een interpretatie van alle berekeningswaarden en toegevoegde informatie door de auteur.

Langtransport over de -20m dieptelijn:

Het langtransport op de -20m dieptelijn is kleiner dan op 8m diepte en varieert kwantitatief dan ook minder. De ondergrens wordt bepaald door verminderde getij snelheden en de bovengrens door relatief kleine korreldiameters (Tabel 9-2).

NAP -20m	afstand tot Den Helder			
	103	76	40	14
gevoeligheidsberekening				
basis berekening	37.7	47.3	88.5	133.3
10 % grotere ebsnelheden	17.8	20.2	61.5	116.7
geen wind effecten	32.5	36.2	50.8	68.7
geen dichtheidsgradiënten	40.5	50.8	85.5	139.5
vermindering van retourstroming (-50%)	35.5	44.5	82.5	123.7
geen lange golven	38.0	50.0	88.0	133.3
10 % kleinere korreldiameters	--	66.8	--	--
10 % grotere korreldiameters	--	41.8	--	--
beste schatting Van Rijn	25+/-15	35+/-15	60+/-25	75+/-30

Tabel 9-2: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde langtransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -20m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is noordwaarts (Van Rijn, 1995)

9.3.2 Golfgedreven langtransport

In de studie van Van Rijn is het effect van het golfklimaat gesimuleerd door vermindering van de kustlijnoriëntatie met 5 graden t.o.v. het noorden. Daardoor verminderde het langtransport in de brandingszone met ongeveer 20% in de profielen 14, 76 en 103 (kustlijnoriëntatie $>15^\circ$) en bij Egmond (km 40) met 50% (kustlijnoriëntatie 8°). Ook is er een simulatie gemaakt met het golfklimaat van 1980-1988 in plaats van 1980-1993. Het golfklimaat van 1980-1988 laat in vergelijking tot het golfklimaat van 1980-1993 minder golven uit zuidwestelijke en iets frequenter golven uit noordwestelijke richting zien, waardoor het netto langtransport in de brandingszone vermindert met 20%.

Het effect van de golfgedreven langsstroming is gesimuleerd door golfgedreven stroomsnelheden te verminderen met 50%. Hierdoor vermindert het langtransport met een factor 5-10.

9.3.3 Windeffect op langtransport

Geïntegreerd over de gehele brandingszone (NAP +3m/-8m) is het windeffect niet erg belangrijk (paragraaf 9.2.1). Voor de transporten op de -8m en -20m dieptelijn heeft de wind echter veel effect. Op ondiep water (NAP-8m) zijn de windeffecten een factor groter dan op diep water (NAP-20m) (zie Tabel 9-3).

afstand tot Den Helder (km)	netto langtransport (m ³ /m/jaar)			
	zonder wind		met wind	factor met/ zonder wind
	PonTos	van Rijn	van Rijn	
NAP -8m				
14	37	40	99	2.5
40	36	34	137	4.0
76	29	23	62	2.7
103	29	26	58	2.2
NAP -20m				
14	42	69	133	1.9
40	41	51	88	1.7
76	35	36	47	1.3
103	35	33	38	1.2

Tabel 9-3: Langtransport op NAP -8m en -20m volgens PonTos en Van Rijn met en zonder wind (Steetzel, 1999)

Op diep water is er volgens Van Rijn een groter wordend windeffect richting het noorden. De windsnelheden worden richting het noorden echter niet significant groter. Verondersteld wordt daarom dat het windeffect richting het noorden groter wordt, doordat de stroomsnelheid niet lineair is met het sedimenttransport. Hierdoor ontstaat bij eenzelfde vergroting van de rest stroomsnelheid (door de wind) een grotere vermeerdering van het sedimenttransport, indien de rest stroomsnelheid zonder wind al groter was.

9.3.4 Langtransport door getij

De bijdrage van getij stromingen op het langtransport in de brandingszone is niet meer dan 20% bij Noordwijk (km 76), maar neemt toe richting het noorden tot ongeveer 40% bij Egmond (km 40), door de grotere getij asymmetrie in het noordelijke deel van de Hollandse kust. Vermeerdering van de ebsnelheden met 10% veroorzaakt een vermindering van het langtransport op 8m diepte van 20-35%.

9.3.5 Langtransport door dichtheidsgedreven stroming

Volgens van Rijn (1995) hebben de dichtheidsgradiënten weinig effect op het langtransport. Op ondiep water (NAP-8m) veroorzaken de gradiënten een kleine vergroting van het langtransport richting het noorden en op diep water vermindert het langtransport richting het noorden (NAP-20m) (Tabel 9-4). Het effect van dichtheidsgedreven stromingen is volgens de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn constant langs de kust. Aangezien de dichtheidsvariëaties vlakbij riviermondingen groter zijn dan langs de rest van de kust, is het effect van dichtheidsgradiënten op een aantal locaties (km 14, 40, 76) waarschijnlijk onderschat.

Ook de rivierafvoer van vooral de Rijn beïnvloeden de dichtheidsgradiënten langs de Hollandse kust en daarmee het langtransport. Hoge rivierafvoeren bij Hoek van Holland blijken de stroming en daarmee het langtransport richting het noorden te vergroten (Roelvink, 2001).

diepte	met dichtheid van Rijn 1995	zonder dichtheid van Rijn 1995	zonder dichtheid TR 1993	zonder dichtheid TR 2000
NAP -8m	62.5	61.2	--	--
NAP -20m	47.3	50.8	55.2	75.0

Tabel 9-4: Vergelijking langtransport waarden ($m^3/m/jaar$) op 8 en 20m diepte bij Noordwijk met en zonder dichtheidsgradiënten, positief is noordwaarts (Van Rijn, 1995; TR 1993; TR 2000)

9.3.6 Invloed constructies op het langtransport

De havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden lopen tot ver in de brandingszone, waardoor het langtransport vrijwel geheel geblokkeerd wordt. Ook de havendammen van de Maasvlakte blokkeren het langtransport, net zoals de diepe toegangseulen, de Euro -en IJgeul die als zandvang werken. De lengte in langsrichting die direct invloed van de havendammen ondervindt is volgens Van Rijn 5-7 keer de lengte van de dammen, wat overeenkomt met 15-20km voor de havendammen van IJmuiden. In de secties direct ten zuiden en ten noorden van de havendammen van IJmuiden is er een aanzienlijke aanzanding en in de secties iets verder van de havendammen is er aan weerszijden erosie. Bij de havendammen van Scheveningen en de Hondsbossche zeekering is ditzelfde patroon minder duidelijk waar te nemen, doordat deze constructies minder ver in de brandingszone lopen.

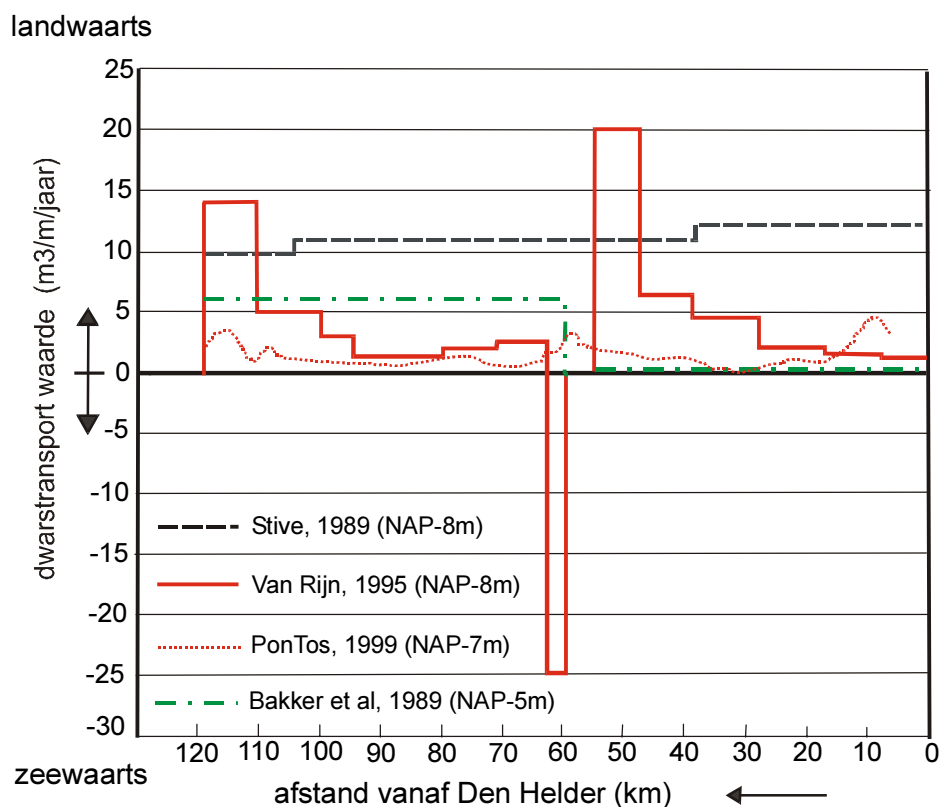
Strandhoofden zijn aanwezig in de secties km 2-31 en km 97-115 en hebben een blokkerend effect op het sedimenttransport in langsrichting. Het blokkerende effect hangt af van de lengte en de hoogte van de strandhoofden. Aangezien wordt verondersteld dat 60-70% (Van Rijn, 1995) van het totale netto langtransport plaatsvindt in de meest landwaartse strook van de brandingszone (ongeveer 200m breed), zal bij aanwezigheid van strandhoofden een deel van het langtransport geblokkeerd worden. Volledige blokkade van het langtransport is niet waarschijnlijk. In de studie van Van Rijn (1995) is het blokkerende effect van de strandhoofden geschat op 20-50% van het ongestoorde netto langtransport in de brandingszone. In de studie van Roelvink (2001) is een reductie factor van 50 % toegepast.

In de toekomst moet bovendien rekening gehouden worden met de aanleg van Maasvlakte 2 en een mogelijk aan te leggen windmolenpark.

9.4 Overzicht dwarstransport uit andere studies

Er bestaan grote verschillen tussen de dwarstransport waarden volgens de verscheidene studies (Figuur 9-2). Echter wordt door alle studies langs de gehele Hollandse kust, kustwaarts gerichte transporten gegeven, behalve direct ten zuiden van IJmuiden door Van Rijn. De waarden variëren echter tussen de 0 en $12 m^3/m/jaar$. Bovendien is volgens de meeste studies het dwarstransport redelijk constant langs de kust.

Niet in alle studies is het dwarstransport echter over dezelfde grens uitgerekend. In de studies van Stive en Van Rijn is de -8m dieptelijns als grens genomen, maar in de PonTos studie de -7m dieptelijns en bij Bakker et al. de -5m dieptelijns. Hierdoor zijn de verschillende studies moeilijk te vergelijken. De dwarstransport waarden uit de studie van Van Rijn zijn in de omgeving van de havendammen niet goed te vergelijken met de andere studies, omdat er ook dwarsgerichte langtransport componenten zijn meegenomen (voor uitleg zie paragraaf 8.4.3.2). Deze componenten veroorzaken de pieken in het dwarstransport bij de havendammen.



Figuur 9-2: Vergelijking dwarstransport waarden Stive, van Rijn, PonTos en Bakker et al.

Het verloop van het dwarstransport bij de havendammen in de studie van Van Rijn is goed te verklaren, door de convergentie van de stroomlijnen om de havendammen. Vanaf Hoek van Holland richting IJmuiden vermindert daarna het dwarstransport door een langzaam verminderde dichtheidsgradiënt. De grootte van de dwarstransporten is vooral bij de havendammen echter erg onzeker. Mogelijk zijn de transporten bij de havendammen een factor 3-4 groter of kleiner dan in de studie van Van Rijn aangegeven.

Verder is het onzeker of het Marsdiep en de buitendelta veel invloed hebben op het dwarstransport. Aangezien het dwarstransport (op de -8m dieptelijn) vaak wordt gerelateerd aan het diep water golfklimaat, is daardoor in de meeste studies een constant dwarstransport ontstaan. Echter is het ondiep water golfklimaat niet constant langs de kust (zie paragraaf 4.5.2.). Daardoor zal waarschijnlijk het dwarstransport vooral in de sectie vanaf de Pettemer Polder (km 20) tot Den Helder aanzienlijk afwijken van de andere kustsecties. Dit is echter niet terug te vinden in de verscheidene studies.

9.5 Processen die het dwarstransport beïnvloeden

9.5.1 Gevoeligheidsberekeningen

In deze paragraaf worden bestudeerd wat de belangrijkste parameters zijn die het dwarstransport beïnvloeden. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen transporten over de -8 en -20m dieptelijn. De gevoeligheidsberekeningen in deze paragraaf zijn grotendeels een samenvatting van de resultaten uit de studie van Van Rijn (1995).

NAP -8m Gevoeligheidsberekening	afstand tot Den Helder			
	103	76	40	14
basis berekening	-3.7	3.8	-9.2	-1.2
10 % grotere ebsnelheden	-3.3	2.8	-10.5	-0.3
geen wind effecten	-6.5	-8.0	-17.2	-5.8
geen dichtheidsgradiënten	-17.2	-6.5	-17.7	-6.7
vermindering van retourstroming (-50%)	19.0	29.2	23.0	23.7
geen lange golven	10.0	22.7	12.0	20.0
10 % kleinere korreldiameters	--	-13.8	--	--
10 % grotere korreldiameters	--	12.3	--	--
beste schatting Van Rijn	0+/-10	0+/-10	0+/-10	0+/-10

Tabel 9-5: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde dwarstransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -8m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is kustwaarts (Van Rijn, 1995)

Uit de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn (1995) volgt dat het dwarstransport op de -8m dieptelijn bestaat uit een zeewaarts gericht suspensie transport en een kustwaarts gericht bodemtransport, waarbij op de meeste locaties de kustwaarts gerichte component dominant is. Netto kustwaarts gerichte transporten worden veroorzaakt door het Longuet-Higgins stromingseffect, asymmetrie in golfsnelheden en dichtheidsgradiënten. Netto zeewaarts gerichte transporten worden veroorzaakt door lange golfeffecten en de undertow. Relatief fijn zand resulteert in een zeewaarts transport en relatief grof zand in een kustwaarts transport (Tabel 9-5).

NAP -20m Gevoeligheidsberekening	afstand tot Den Helder			
	103	76	40	14
basis berekening	6.5	18.2	39.2	8.2
10 % grotere ebsnelheden	8.5	19.7	34.2	10.7
geen wind effecten	9.8	17.8	23.2	16.7
geen dichtheidsgradiënten	-2.7	-0.2	20.0	-23.0
vermindering van retourstroming (-50%)	7.3	19.3	41.7	13.0
geen lange golven	7.5	19.8	41.3	11.2
10 % kleinere korreldiameters	--	20.2	--	--
10 % grotere korreldiameters	--	18	--	--
beste schatting Van Rijn	0+/-10	10+/-10	15+/-10	5+/-10

Tabel 9-6: Gevoeligheidsberekening jaarlijks gemiddelde dwarstransport ($m^3/m/jaar$) op NAP -20m, zonder de aanwezigheid van constructies, positief is kustwaarts (Van Rijn, 1995)

Het dwarstransport op NAP -20m wordt gedomineerd door getijgedreven, windgedreven en dichtheidsgedreven stromingen in combinatie met het losmakende effect door golfbewegingen, waarbij de bovengrens wordt gedomineerd door dichtheidsgradiënten. Het Longuet-Higgins stromingseffect, asymmetrie in golfsnelheden, gebonden lange golfeffecten en undertow lijken verwaarloosbaar. De korreldiameter is veel minder bepalend voor het dwarstransport dan op ondieper water (Tabel 9-6).

9.5.2 Windeffect op dwarstransport

Het effect van cross-shore wind is vooral merkbaar in de lage delen van de waterkolom en veroorzaakt een zeewaarts stroming aan de bodem en een kustwaarts stroming hoger in de waterkolom, consistent met het down-welling patroon. Netto is de zeewaartse stroming overheersend (Roelvink, 2001). Waarschijnlijk volgen de transporten hetzelfde patroon ten gevolge van de wind. Volgens de gevoeligheidsberekeningen in de studie van Van Rijn is dit windeffect echter alleen merkbaar langs de gehele kust op 8m diepte, waarbij de zeewaarste component van het langstransport vergroot wordt met 3-11 $m^3/m/jaar$ (Tabel 9-6). Op 20m

diepte wordt de zeevaarste component alleen vergroot door windeffecten bij km 40 en in kleine mate bij km 76.

9.5.3 Dwarstransport door dichtheidsgedreven stroming

De invloed van dichtheidsgradiënten is op diep water (NAP-20m) over het algemeen groter dan op ondieper water (NAP-8m) (Tabel 9-7). Het veroorzaakt een kustwaarts gericht transport aan de bodem en een zeevaarts gericht transport hoger in de waterkolom, waarbij het kustwaartse transport overheersend is. Langs de gehele Hollandse kust blijkt deze estuaria-achtige dichtheidsgedreven circulatie in meer of mindere mate aanwezig te zijn. Deze wordt iets gematigd door de cross-shore wind stress. Richting het noorden wordt de invloed van dichtheidsgradiënten op ondiep water minder, terwijl op diep water het de invloed juist groter wordt, volgens de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn. De afname van deze invloed op diep water richting het noorden is niet direct te verklaren en is daarom onzeker.

afstand tot Den Helder	103	76	40	14
NAP -8m				
met dichtheid	-3.7	3.8	-9.2	-1.2
zonder dichtheid	-17.2	-6.5	-17.7	-6.7
NAP -20m				
met dichtheid	6.5	18.2	39.2	8.2
zonder dichtheid	-2.7	-0.2	20.0	-23.0

Tabel 9-7: Vergelijking dwarstransport waarden ($m^3/m/jaar$) op 8 en 20m diepte met en zonder dichtheidsgradiënten, positief is kustwaarts (Van Rijn, 1995)

9.5.4 Invloed constructies op het dwarstransport

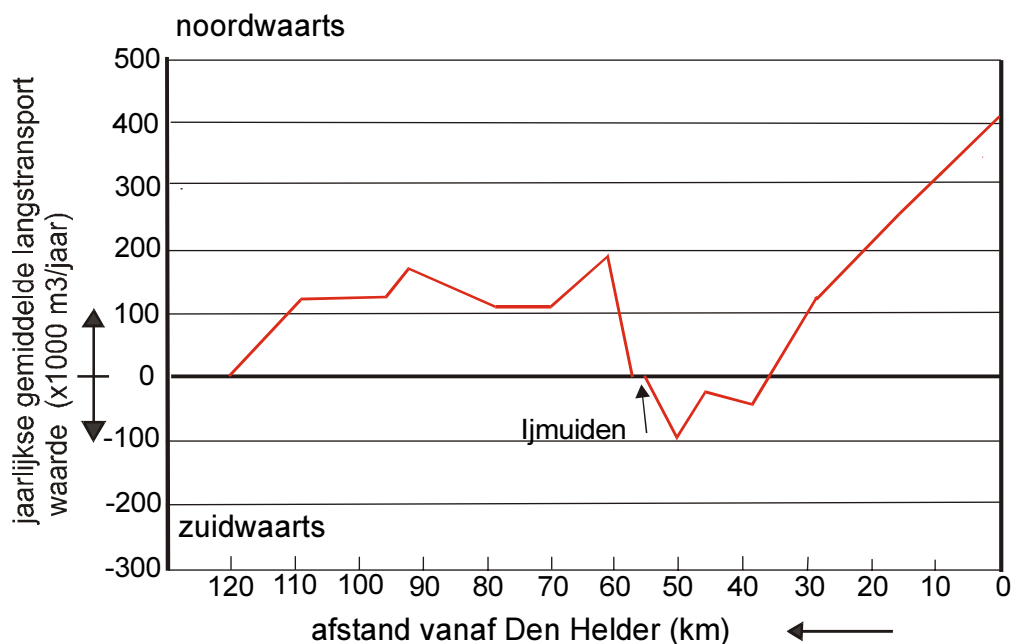
Het dwarstransport lijkt alleen vrij plaatselijk beïnvloed te worden door constructies, zoals bij de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland. Door deze barrières convergeert de getijdenstroming bovenstreams (ten zuiden) van de barrières en divergeert de stroming benedenstreams (ten noorden), waardoor respectievelijk zeevaarts en kustwaarts transport ontstaat. Bij de havendammen van Scheveningen en de Hondsbossche zeekering vindt hetzelfde proces plaats, maar heeft het minder effect op het dwarstransport, doordat deze constructies tot minder ver in de brandingszone komen.

In de secties waar palenrijen en/of strandhoofden aanwezig zijn worden cross-shore muistromen en undertow stromingen opgewekt, resulterend in erosie in de gebieden tussen de strandhoofden (Short, 1991). Volgens Short zijn in de gebieden met strandhoofden meer ribbels te vinden en worden er meer pluning brekende golven waargenomen en daardoor is er een grotere mobiliteit en transport van sediment door de undertow en muistromen. Het is echter onzeker of dit een effect heeft op het netto dwarstransport.

9.6 Huidige morfologische beeld

9.6.1 Langstransport in de zone NAP +3m tot NAP-8m

Het huidige morfologische beeld van het netto langstransport in deze studie is gerelateerd aan de studie van Van Rijn (1995), die in deze studie aangepast is aan recentere calibratie volumes (paragraaf 8.5). Hierdoor verschilt het huidige beeld aanzienlijk met de uitkomsten uit de studie van Van Rijn, maar ook vergeleken met andere studies zijn de verschillen groot. Ten zuiden van de havendammen van IJmuiden komen de waarden in tegenstelling tot ten noorden van de havendammen meer overeen met de meeste andere studies (Figuur 9-1).



Figuur 9-3: Huidige beeld jaarlijkse gemiddelde netto langstransport geïntegreerd over de zone NAP+3 tot NAP-8m (m³/jaar)

Vanaf de havendammen van Hoek van Holland neemt de langstransport gradiënt geleidelijk toe richting het noorden, doordat het langstransport steeds minder invloed ondervindt van golfafscherming door de havendammen van Hoek van Holland. (Figuur 9-3). Doordat het langstransport vanaf km 98 geen invloed meer ondervindt van de strandhoofden, zal de langstransport gradiënt daarna toenemen vergeleken met de sectie waar wel strandhoofden aanwezig zijn. De kustlijnoriëntatie t.o.v. het noorden wordt daarna minder, en in de sectie km 85-75 is de kustlijnoriëntatie constant. Er zijn geen directe redenen waarom het getij, wind en/of golven hier zouden variëren. Daarom wordt er vanaf km 98 tot km 85 een geleidelijk afnemende langstransport gradiënt verondersteld, waarna in de sectie km 85-75 het langstransport constant wordt (zie paragraaf 9.3.2).

Vanaf Noordwijk wordt verondersteld dat het langstransport invloed ondervindt van het de havendammen van IJmuiden. Er ontstaat een grote piek in het langstransport richting de havendammen tot ongeveer 200.000 m³/jaar. Daarbij is de benadering toegepast van het meebewegende assenstelsel, zoals beschreven in paragraaf 9.4.3.2. Het netto langstransport direct ten noorden van de havendammen is zuidwaarts gericht door afscherming van de golven uit de richtingen west en zuidwest en neemt toe tot een waarde van ongeveer 100.000 m³/jaar. Bij Egmond (km 40) wordt het netto langstransport weer noordwaarts gericht.

Vanaf Egmond richting Den Helder neemt het langstransport geleidelijk toe, echter in mindere mate dan in de meeste andere studies (Stive, 1989, Van Rijn 1995) aangenomen. Bij Den Helder wordt een netto langstransport in noordelijke richting aangenomen van 400.000 m³/jaar. Het netto langstransport richting Den Helder is erg onzeker, omdat de invloed van de buitendelta en de Waddenzee zeer complex is en er weinig bekend is over de achterliggende processen.

Het verloop van de langstransport waarden lijkt redelijk betrouwbaar te zijn, behalve richting het Marsdiep bestaan nog grote onzekerheden omtrent de langstransport gradiënten. Kwantitatief zijn de onzekerheden echter groter, vooral richting het noorden, doordat het netto langstransport noordwaarts gericht is. Ten noorden van de havendammen blijkt de onzekerheid van het langstransport een stuk groter te zijn dan ten zuiden van de havendammen.

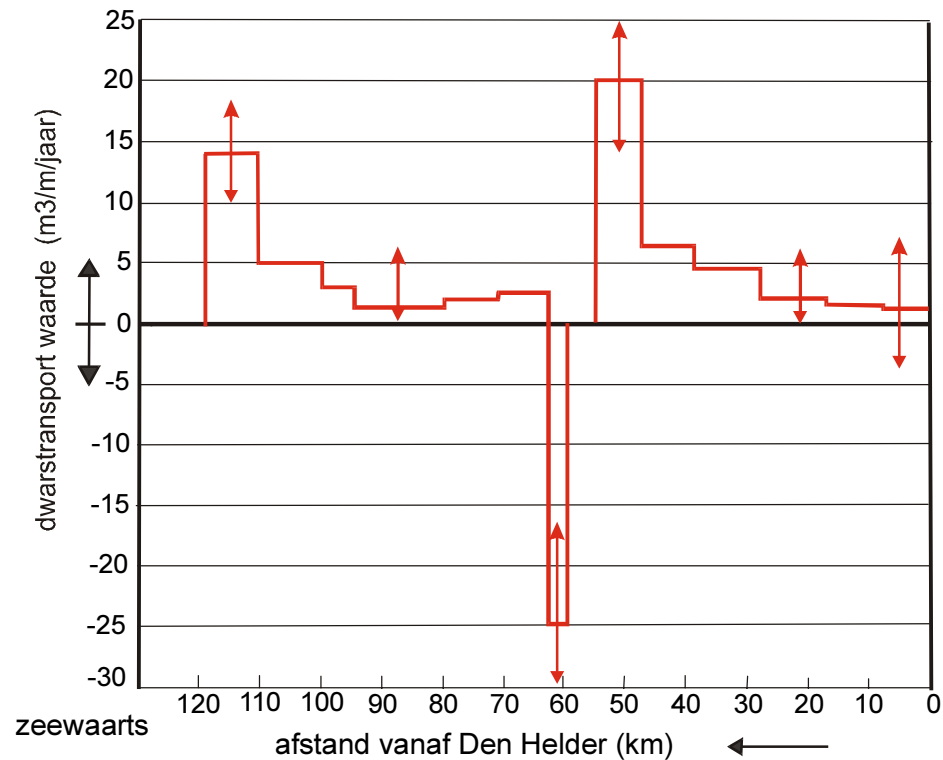
9.6.2 Dwarstransport over de -8m dieptelijn

Het dwarstransport over de NAP -8m dieptelijn is redelijk constant langs de Hollandse kust (Figuur 9-4). Het jaarlijkse gemiddelde netto dwarstransport is kustwaarts gericht en is circa 0 tot 6 m³/m/jaar. Vanaf Hoek van Holland richting IJmuiden vermindert het dwarstransport door een langzaam verminderde dichtheidsgradiënt.

Het ondiep water golfklimaat is niet constant langs de kust door de aanwezigheid van de buitendelta en andere ondieptes (zie paragraaf 4.5.2.). Daardoor zal waarschijnlijk het dwarstransport in de sectie vanaf de Pettemer Polder (km 20) tot Den Helder aanzienlijk afwijken van de andere kustsecties. Het is echter moeilijk aan te geven hoe het dwarstransport in deze sectie eruit ziet, zonder aanvullende modelberekeningen uit te voeren.

Bij de havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden zijn er grote pieken in het dwarstransport, indien er een meebewegend assenstelsel wordt toegepast (paragraaf 9.4.3.2). Door de convergentie en divergentie van de stroomlijnen om de havendammen ontstaat ten zuiden van de havendammen een zeewaarts dwarstransport en ten noorden een kustwaarts dwarstransport.

landwaarts



Figuur 9-4: Huidige beeld netto jaarlijkse gemiddelde dwarstransport over de NAP-8m dieptelijn (m³/m/jaar)

10 Conclusies en aanbevelingen

10.1 Conclusies

Er zijn vele studies verricht naar de transporten en de hydrodynamica van de Hollandse kust, maar er bestaat echter geen eenduidig beeld van heersende transporten en de maatgevende processen. Daarom is in deze studie door middel van een gedetailleerde her-analyse van de verschillende morfologische studies van de Hollandse kust aangevuld met (nieuwe) meetgegevens een eenduidiger beeld gevormd van het huidige (2000) hydrodynamische en morfodynamische gedrag van de Hollandse kust.

Uit analyse van extra lange meetreeksen volgt een redelijk eenduidig en overeenkomstig beeld van de hydrodynamica vergeleken met eerdere studies. De variatie van de golven, getij en wind is niet groot langs de Hollandse kust.

Golven: Het golfklimaat op diep water is redelijk constant, waarbij er zuidwaarts een vermindering van golven uit de richting west en noordnoordwest is, samengaand met een kleine vergroting van golven uit de richtingen westzuidwest en noord. De extreme golven zijn hoger bij de noordelijke gelegen stations, door de meer blootgestelde locatie van de noordelijke stations voor noordwesten wind, van waaruit de hoogste golven komen.

Het golfklimaat op ondiep water varieert echter meer langs de kust dan op diep water, door zandbanken, ondieptes en de buitendelta. De buitendelta en de ondieptes voor de Texelse kust werken als een soort golfbreker, waardoor de golfaanval op de kust vanaf Den Helder tot ongeveer de Pettemer Polder (km 20) kleiner is. De invloed op de golfrichtingen is mogelijk nog verder naar het zuiden merkbaar, tot ongeveer km 25.

Getij: De getijgolf langs de Hollandse kust verplaatst zich van zuid naar noord en de getijslag neemt richting het noorden geleidelijk af, van 1.75m bij Hoek van Holland en Scheveningen tot 1.4m bij Den Helder. De getij asymmetrie neemt toe richting Den Helder, waardoor de rest stroomsnelheid toeneemt van ongeveer 0.1 m/s tot 0.15 m/s bij Callantsoog (km 14) (Rijkswaterstaat, 1993).

Stromingen: De gezamenlijke werking van de golven, wind, getij en dichtheidsgradiënten bepalen de reststromingen, maar zijn niet strikt van elkaar te scheiden, omdat deze elkaar in sterke mate beïnvloeden. Uit metingen bij Egmond volgt dat de cross-shore snelheden over het algemeen gering zijn t.o.v. de longshore snelheden (factor 2-3) (Van Rijn, 2002). De maximale getijde stroomsnelheid in langsrichting tijdens vloed (eb) kan met een factor 3 tot 4 vergroot worden door de wind en golfgedreven processen gedurende stormcondities, volgens metingen bij Egmond (Van Rijn, 2002). Metingen bij Noordwijk (km 76) wijzen erop dat de reststromingen in langsrichting in de nearshore zone windgedreven zijn (Roelvink et al., 2001). In het geval van grote rivierafvoeren heeft de windgedreven stroming nog meer invloed. De verticale bijdrage van de reststroming in dwarsrichting wordt grotendeels bepaald door estuaria-achtige dichtheidsgedreven circulatie, die iets gematigd door de cross-shore wind stress, consistent met het down-welling patroon.

Om een eenduidiger beeld van de morfodynamica te vormen (naast de hydrodynamica), zijn de sedimentbudget studies van Stive (1989) en Van Rijn (1995) met elkaar vergeleken. Hieruit bleek dat er grote verschillen tussen beide studies zijn ontstaan door het gebruik van verschillende calibratie volumes, de processen die worden meegenomen, kwantificering van kustontwikkelingen, verschillende hoogten van het actieve profiel, verschillende bovengrenzen en grenzen in langsrichting van de beschouwde secties, andere processen als sluitingsvolume en een verschillende definitie van dwarstransport.

Bij vergelijking van de gebruikte calibratie volumes tussen de studie van Stive (JARKUS data 1965-1985 en trendanalyses 1850-1985) en Van Rijn (JARKUS data 1964-1992) blijkt dat trends uit de studie van Stive waarschijnlijk niet representatief meer zijn voor de huidige kustontwikkelingen, door de vele menselijke ingrepen en mogelijk een kleine verandering van

omgevingscondities. De calibratie volumes uit de studies van Van Rijn wijken echter ook af van de volumes uit recentere studies (Groenendijk, 1997, Stam, 1999). Door de vele menselijke ingrepen na 1960 is in de omgeving van deze ingrepen (voornamelijk bij havendammen) waarschijnlijk een trendverandering opgetreden, waarvan het effect langzaam af aan het nemen is, zoals waarneembaar is bij het Kennemerstrand (km 56-60).

In de studie van Stive zijn de suppletie en bagger volumes verwaarloosd, waardoor 255.000 m³/jaar te weinig is meegenomen in de zandbalans. Van Rijn heeft het zeespiegelrijzingseffect verwaarloosd; maar aangezien dit in zijn modelformulering als een herverdelingsproces over het dwarsprofiel wordt beschouwd wordt de fout die hierdoor ontstaat klein verondersteld.

De processen in de zandbalans in de studie van Van Rijn zijn gekwantificeerd vanuit volumeveranderingen en in de studie van Stive via kustlijnverplaatsingen. De voorkeur ligt echter bij volumeveranderingen, omdat de zandbalans dan makkelijker te corrigeren is voor suppletievolumes en de trend van de kustontwikkeling dan betrekking heeft over het gehele dwarsprofiel.

Stive gebruikte het langtransport als sluitingsvolume van de zandbalans en Van Rijn het dwarstransport over de -8m dieptelijn. Het dwarstransport over de -8m dieptelijn kan het beste als sluitingsvolume van de zandbalans worden genomen, omdat dit de grootste onzekerheid blijkt te zijn in de zandbalans.

Het verschil in dwarstransport over de -8m dieptelijn tussen beide studies is bij de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland veroorzaakt door een verschillende definitie van dwarstransport. Langs de rest van de Hollandse kust komt het verloop van het dwarstransport redelijk overeen, al bestaat er wel een kwantitatief verschil van 5-10 m³/m/jaar.

Indien de langtransport waarden uit de studie van Van Rijn aangepast worden, door te corrigeren voor recentere trendontwikkelingen, komen de transporten ten zuiden van IJmuiden goed overeen met het langtransport uit de studie van Stive. Van Rijn lijkt langs de Zuid-Hollandse kust het langtransport overschat te hebben. Langs de Noord-Hollandse kust blijven er grote verschillen bestaan.

Na vergelijking en analyse van de studie van Stive en Van Rijn zijn de transportwaarden vergeleken met andere studies, zoals PonTos (1999) en Roelvink (2001). Hieruit blijkt dat:

- Het langtransport in de brandingszone en het dwarstransport over de -8m dieptelijn bepalen grotendeels de kustontwikkeling langs de Hollandse kust. Het dwarstransport over de +3m/duinvoet en het zeespiegelrijzingseffect zijn minder belangrijk.
- Dwarstransport over de -8m dieptelijn is de grootste onzekerheid in de zandbalans van de Hollandse kust. Dit wordt veroorzaakt door de grote gevoeligheid voor de verschillende parameters die het langtransport bepalen en de relatief kleine transportwaarden (echter over een grote lengte in langsrichting). Uit de gevoeligheidsberekeningen van Van Rijn (1995) volgt dat het dwarstransport over de -8m dieptelijn bestaat uit een kustwaarts gerichte component, die wordt veroorzaakt door het Longuet-Higgins stromingseffect, asymmetrie in golfsnelheden en dichtheidsgradiënten. Netto zeewaarts gerichte transporten worden veroorzaakt door lange golfeffecten en de undertow. Relatief fijn zand resulteert in zeewaarts transport en relatief grof zand in kustwaarts transport.
- De betrouwbaarheid van de langtransport gradiënten in de brandingszone (NAP +3m/-8m) is langs de Zuid-Hollandse kust groter dan langs de Noord-Hollandse kust. In de buurt van de havendammen van IJmuiden en richting het Marsdiep is het langtransport moeilijk te kwantificeren en is de onzekerheid het grootste. De omvang van de effecten van strandhoofden en palenrijen is niet geheel duidelijk, maar wordt verondersteld het lanstransport met ongeveer 50% te verminderen. Het langtransport in de brandingszone blijkt over vrijwel de gehele lengte van de kust invloed te ondervinden van de aanwezige constructies. Volgens de gevoeligheidsberekeningen uit de studie van Van Rijn wordt het langtransport in de brandingszone vooral bepaald door het golfklimaat (en de daarmee samenhangende kustlijnoriëntatie), de dieptegemiddelde langsstroming, de aanwezigheid van

brekerbanken, de bodemhelling en de korreldiameter. De wind en het getij blijken minder effect te hebben op het totale geïntegreerde langtransport in de brandingzone, doordat het meeste langtransport dicht bij de kust plaatsvindt en golfgedreven is. Op de -8 en -20m dieptelijn is het effect van wind en getij echter wel groot.

- Er is weinig bekend van de transporten op dieper water (NAP -8/-20m).
- In alle studies die de transporten beschouwen wordt aangenomen dat suppleties geen invloed hebben op de transporten in de kustzone, ondanks de grote input van ongeveer 2-3 Mm³/jaar in het kuststelsel.

Uiteindelijk ontstaat het volgende beeld van het langtransport langs de Hollandse kust (zie Figuur 9-3): Vanaf Hoek van Holland richting Scheveningen neemt het netto langtransport toe van nul tot een waarde van ongeveer 120.000 m³/jaar. Ten noorden van Scheveningen (km 98) neemt de langtransport gradiënt over een korte afstand toe ten opzichte van de aanliggende sectie, doordat er geen strandhoofden meer aanwezig zijn. De kustlijnoriëntatie t.o.v. het noorden wordt daarna minder, waardoor de langtransport gradiënt geleidelijk zal verminderen tot Noordwijk (km 75). Vanaf Noordwijk wordt verondersteld dat het langtransport invloed ondervindt van de havendammen van IJmuiden, waardoor het langtransport toeneemt tot een waarde van 200.000 m³/jaar. Langs –en dwarstransport is richting de havendammen moeilijk te scheiden en daardoor onzeker. Het netto langtransport direct ten noorden van de havendammen is zuidwaarts gericht en neemt toe tot een waarde van ongeveer 100.000 m³/jaar. Bij Egmond (km 40) wordt het netto langtransport weer noordwaarts gericht. Van Egmond richting Den Helder neemt het langtransport geleidelijk toe tot 400.000 m³/jaar. Het netto langtransport richting Den Helder is erg onzeker, omdat de invloed van de buitendelta en de Waddenzee zeer complex is en er weinig bekend is over de achterliggende processen.

Het dwarstransport over de NAP -8m dieptelijn is redelijk constant langs de Hollandse kust (zie Figuur 9-4). Het jaarlijkse gemiddelde netto dwarstransport is kustwaarts gericht en is circa 0 tot 6 m³/m/jaar. Vanaf Hoek van Holland richting IJmuiden vermindert het dwarstransport door een langzaam verminderde dichtheidsgradiënt. Het ondiep water golfklimaat is niet constant langs de kust door de aanwezigheid van de buitendelta (zie paragraaf 4.5.2). Daardoor zal waarschijnlijk het dwarstransport in de sectie vanaf de Pettemer Polder (km 20) tot Den Helder aanzienlijk afwijken van de andere kustsecties. Het is echter moeilijk aan te geven hoe het dwarstransport in deze sectie eruit ziet, zonder aanvullende modelberekeningen. Bij de havendammen van Hoek van Holland en IJmuiden zijn er grote pieken in het dwarstransport, indien er een meebewegend assenstelsel wordt toegepast (paragraaf 9.4.3.2). Door de convergentie en divergentie van de stroomlijnen om de havendammen ontstaat ten zuiden van de havendammen een zeewaarts dwarstransport en ten noorden een kustwaarts dwarstransport.

10.2 Aanbevelingen

Uit deze studie en bovenstaande conclusies komen de volgende aanbevelingen voor toekomstig onderzoek:

Wat zijn de effecten van suppleties na 1990 op de transporten? Door de grote input van sediment in het kuststelsel na invoering van de BKL in 1990 is het vraag of de trend van de kustontwikkeling die gebruikt is bij de calibratie van de morfologische modellen nog representatief is voor de huidige trend. Dit kan gebeuren door middel van trendanalyses (ook op dieper water), al is de periode waarschijnlijk te kort om zekerheid te geven.

Meer studie naar het netto langtransport langs de kust in de brandingszone (NAP +3m/-8m) en dwarstransport over de -8m dieptelijn vanaf Egmond tot Den Helder onder invloed van de

buitendelta en het Marsdiep. Hierbij kunnen proces gemodelleerde modellen gebruikt worden en het literatuuronderzoek worden uitgebreid (bijvoorbeeld COAST3D; Van Rijn, 2002). Onderzoek naar de transporten op dieper water (buiten de -8m dieptelijn), zoals het langstransport in de zone NAP-8m/-20m -en dwarstransport over de -20m dieptelijn. Het dwarstransport over de -20m dieptelijn is belangrijk, omdat deze lijn als de actieve ondergrens van het kuststelsel wordt beschouwd, waarover geen zand wordt getransporteerd. Uit de studies van Van Rijn en Stive volgen echter dwarstransport waarden van respectievelijk 0-15 m³/m/jaar (met een variatie van 10 m³/m/jaar) en 1-3 m³/m/jaar.

Meer studie naar het dwarstransport over de -8m dieptelijn. Er is meer inzicht vereist in de processen die een rol spelen bij het dwarstransport over de -8m dieptelijn. Dit inzicht kan verkregen worden met behulp van bijvoorbeeld proces gemodelleerde modellen. Ook kan getracht worden de gebruikte modellen beter te calibreren, met behulp van bijvoorbeeld nieuwe stromingsmetingen. Aangezien in de omgeving van de havendammen van IJmuiden en Hoek van Holland het dwarstransport onzeker is, is het aan te raden in vervolg studie in te zoomen op de havendammen, met data die in deze studie nog niet is beschouwd en proces gemodelleerd modelonderzoek.

Referentielijst

- Adriani, M.J., Terwindt, J.H.J. (1974). Sand stabilisation and dune building. Rijkswaterstaat Communications 19.
- Alrigde, J.N., (1997). Hydrodynamic model predictions of tidal asymmetry and observed sediment transport paths in Morecambe Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 44, 39-56.
- Arens, S.M. (1994). Aeolian processes in the Dutch foredunes. Ph.D. Thesis. Universiteit van Amsterdam
- Augustijn, B., Daan, J., Mourik, B., Messerschmidt, D., Zwart, B., (1990). Stormenkalender: chronologisch overzicht van alle stormen langs de Nederlandse kust voor het tijdvak 1964-1990. KNMI de Bilt. publicatie nr. 176.
- Augustijn, B., Zwart, B., (1997). Stormenkalender: chronologisch overzicht van alle stormen (windkracht 8 en hoger) langs de Nederlandse kust voor het tijdvak 1990-1996. KNMI de Bilt. publicatie nr. 176; supplement.
- Bailard, J.A., (1981). An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *J. Geophy. Res.*, 86: 10,938-10,954.
- Bakker, W.T., Dijkman, M.J., Vroeg, J.H., (1989). Two-line model of Dutch coast . Afdeling Kustwaterbouwkunde, Civiele Techniek, TU Delft.
- Bavelaar, A., (1988). Verandering van de getijbeweging in de Noordzee ten gevolge van zeespiegelrijzing van 1 meter. GWAO-88-404. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.
- Beets, D.J., (1994). Geologisch onderzoek naar de erodeerbaarheid van de vooroever. Rapport Kustgenese CL-935248, Rijks Geografische Dienst, Haarlem.
- Boers, M., (2002), Zandgolven langs de Noordhollandse kust. Een bijdrage aan meerjarige suppletieplanning. RIKZ/OS/2002.117X
- Bonekamp, J.G., Ridderinkhof, H., Roelvink, J.A., Luijendijk, A.P., (2002). Sedimenttransport in the Texel inlet due to tidal asymmetries.
- Borst, J.C. (1987). Verkennende beschrijving van het stroomklimaat in het kustvak Delfland. Rijkswaterstaat, Not GWAO-87-4.77.
- Boutmy (1998). Morphological impact of IJmuiden harbour; Validation of Delft3D, TU Delft, RIKZ, Delft Hydraulics.
- Bouwmeester, E.C., Kalf, R.B., Walburg, A.M., (1995). Statische analyse van de Nederlandse morfologische ontwikkeling. RIKZ/ 94-045.
- Bruun, P., (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *ASCE J. Waterways Harbours Division* 88, pp 117-130.
- Bruun, P., (1988). The Bruun rule of erosion by sea-level rise. *J. Coast. Res.* 4 (4), pp 627-648.
- Capobianco, M., (1998). Predictability for long-term coastal evolution-handling the limiting factors. 3rd European Marine Science and Technology Conference, Scientific Colloquium Predictability for long-term coastal-evolution- Is it feasible? 23-27 May, Lisbon, Portugal, pp. 277-288
- De Kruif, A.C., Keijer, A.M., (2003). Evenwichtsligging van het Kennemerstrand en aanzanding havenmond IJmuiden; Een analyse van de morfologische ontwikkeling in het kustgebied rond IJmuiden. RIKZ, 2003.054.
- De Ruig, J.H.M., (1989). De sedimentbalans van de gesloten Hollandse kust over de periode 1963 tot 1986. Nota GWAO-89.016. Rijkswaterstaat, Den Haag.
- De Ruig, J.H.M., Louisse, C.J., (1991). Sand budget trends and changes along the Holland coast. *Journal of Coastal Engineering*, Vol 7, nr 4, pp 1013-1027.
- De Vriend, H.J., Stive, M.J.F., (1988). Quasi-3D modelling of nearshore currents. *Coastal Engineering* 11, pp 565-602
- Elias, E.P.L., Klein, M.D., Walstra, D.J.R., van Rijn, L.C., (2001). Persoonlijke communicatie. COAST3D. The Egmond model. Hydrodynamic validation of Delft3D with field measurement of Egmond-pilot experiment, April-May, 1998.

- Elias, E.P.L., Stive, M.F., Bonekamp, J.G. (2002). Morphodynamics at the updrift side of inlets. Persoonlijke communicatie.
- Elias, E.P.L., Stive, M.F., Bonekamp, J.G., Cleveringa, J. (2003). Tidal Inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal Engineering Journal*.
- Groenendijk, F.C. (1995 a). Zand voor Nederland. Een analyse vanaf 1964 en een extrapolatie tot 2010 van het zandvolume in de JARKUS zone, Rapport RIKZ-95.003.
- Groenendijk, F.C. (1995 b). Kustvoorspelling 1995. Integratienota van de Kustgeneserapporten ten behoeve van de voorspelling van de Nederlandse kust.
- Groenendijk, F.C. (1997). Zand voor Nederland; een analyse vanaf 1964 en een extrapolatie tot 2010 van het zandvolume in de jarkus-zone. RIKZ, Den Haag.
- Hayes, M.O., (1979). Barrier Island morphology as a function of tidal and wave regime. Academic Press, New York.
- Hoozemans, F.M.J. (1989). Het windklimaat ter hoogte van de Nederlandse kust over de periode 1907-1980. Analyse van lichtschipwaarnemingen. Nota GWAO 89.010. Rijkswaterstaat/ Dienst Getijdewateren, Den Haag
- Hoozemans, F.M.J. (1990). Long term changes in wind and wave climate on the North Sea. Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Eng. Delft. The Netherlands
- Houwman, K., Hoekstra, P., (1994). Shoreface hydrodynamics. Dept. of Physical Geography, Universiteit Utrecht.
- Knoester, D., (1990). De morfologie van de Hollandse kustzone (analyse van het JARKUS-bestand 1964-1986). Nota GWAO-90.010, Rijkswaterstaat/Dienst Getijdewateren, Den Haag.
- Kustbalans (1995). De tweede kustnota, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, april 1996.
- Louters, T en Gerritsen, F., (1994). Het mysterie van de Wadden; Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging, Rijks Instituut voor Kust en Zee/RIKZ
- Mulder, J.P.M., (1999). Zandverlies op dieper water: Een samenvatting van de jongste inzichten; werkdocument van het RIKZ/ OS99.165X
- Mulder, J.P.M., (2000). Zandverliezen in het Nederlandse kustsysteem. Advies voor dynamische handhaven in de 21^e eeuw. RIKZ/2000.36
- Mus, A.D., (2003). Duinveiligheid van de kust van Noord-Holland, nabij het zeegat van Texel. M.Sc Thesis. Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft.
- Ribberink, J.S., (1997). Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows. Delft Hydraulics, Delft.
- Rijkswaterstaat, TR6, (1988). Zeespiegelrijzing, Hydro Meteo Scenario's.
- Rijkswaterstaat, (1993). Two-dimensional horizontal coastal flow model. Rapport GWAO 93.123X, Den Haag.
- RIKZ (2003). Getijtafels voor Nederland 2004. Rijksinstituut voor Kust en Zee, afdeling informatiesystemen. Den Haag. ISBN 90-12-09919-6.
- Roelvink, J.A., Stive, M.J.F., (1989). Wave-induced cross-shore flow variations and related bar formation on a beach. *J. Geophysical Research*, Vol. 94, No . C4, pp 4785-4800.
- Roelvink, J.A., (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering* 19, pp 127-150.
- Roelvink, J.A., en Reniers, A., (1994). Yearly-averaged sediment transport along the Dutch shore: Upgrading of UNIBEST. Report H2129. Delft Hydraulics, Delft.
- Roelvink, J.A., Ruessink, B.G., van der Kaaij, T., Bos, K.J., (2001). Inceptierapport perceel 2. Mare. WL Delft.
- Roskam, A.P., (1988). Golfklimaten voor de Nederlandse Kust, Nota GWAO-88.046.
- Roskam, A.P. en Hoekema, J., (1996). Randvoorwaarden voor golfperioden langs de Nederlandse kust, Rijks Instituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Sha, L.P., (1990). Sedimentological studies of the ebb tidal deltas along the West Frisian Islands, The Netherlands. Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht.
- Short, A.D., (1991). Beach morphodynamic systems of the central Netherlands coast, Den Helder to Hoek van Holland. GEOPRO-report 1991.01, Dept. of Physical Geography, Utrecht University, The Netherlands.

- Speer, P., Aubrey, D.C., Friedrichs, C.T., (1991). Non-linear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems, in Parker B.B. (e.d.) *Tidal Hydrodynamics*, J. Wiley & Sons, New York.
- Smith, S.D., Banke, E.G., (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J.R. Met. Society*, No 101, 665-673.
- Spanhoff, R., Borst, J.C., van Heuvel, T., De Kok, J., Sloekers, A., (1987). *Baggerstorting bij Scheveningen*. Rijkswaterstaat, Nota GWAO-87.269.
- Stam, J.M.T., (1999). *Zandverlies op diep water aan de Hollandse kust*, Rapport RIKZ-99.006.
- Steezel, H.J., de Vroeg, J.H., (1999). Update and validation of the PonTos-model. Joint Venture Alkyon Hydraulic Consultancy & Research - WL, Delft Hydraulics, Report A244/Z2559, Delft, The Netherlands.
- Steezel, H.J., Wang, Z.B., (2003). Development and application of a large-scale morphological model of het Dutch coast; Formulation and application of the PonTos-model version 1.4. Joint Venture Alkyon Hydraulic Consultancy & Research - WL, Delft Hydraulics.
- Stolk, A. (1989). *Zandsysteem kust- een morfologische karakterisering*. Kustverdediging na 1990, Technisch Rapport 1, Dept. of Physical Geography, Utrecht University, Report GEOPRO 1989-02.
- Stive, M.J.F., de Vriend, H.J., (1987). Quasi-3D nearshore current modelling: wave-induced secondary current. *Proc. ASCE Conference on Coastal Hydrodynamics*, Delaware, 1987.
- Stive, M.J.F., (1989). *Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090*. Kustverdediging na 1990, Technisch Rapport 5, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Stive, M.J.F., Eysink, W.D., (1989). *Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090*. fase3. Deelrapport 3.1: Dynamisch model van het Nederlandse Kustsysteem. Waterloopkundig laboratorium, Report H825.
- Stive, M.J.F., de Vriend, H.J., (1995). Modelling shoreface profile evolution. *Marine Geology* 126 (1995), pp 235-248.
- Stive, M.J.F., Roelvink, J.A., De Vriend, H.J., (1990). Large-scale coastal evolution concept. *Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp 1962-1974
- Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J., Capobianco, M., (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*.
- Tanczos, I., Ruessink, G., Jeuken, C., (2002). *VOP IJmuiden Studie*; Fase 1: "business-as-usual". Delft Hydraulics.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen/ TAW, (1995). *Basisrapport zandige kust*. Behorende bij de leidraad zandige kust.
- Van Alphen, J., (1987). *De morfologie en lithologie van de brandingszone tussen Ter Heijde en Egmond aan Zee*. Rep. NZ-N-87.28, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Van Alphen, J., Damoiseaux, M.A., (1988). Geomorfologische kaart van de Nederlandse kustwateren, schaal 1:125.000. *K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift* 22, pp161-167.
- Van Baak, M., (2002). *Storm-erosion effects on sea dikes*. M.Sc. Thesis, TU Delft, Department of Civil Engineering.
- Van Bemmelen, C.E., (1988). *De korrelgrootte-samenstelling van het strandzand langs de Nederlandse Noordzee-kust*. Universiteit Utrecht, vakgroep Fysische Geografie, GEOPRO-rapport 1988-01.
- Van de Meene, J.W.H., (1994). *The shoreface connected ridges along the Central Dutch coast*. Ph.D. Thesis, Universiteit Utrecht, Geogr. Studies, 174.
- Van der Wal, D., (1999). *Aeolian Transport of Nourishment Sand in Beach-Dune Environments*. Thesis, Universiteit van Utrecht.
- Van Malde, J., (1984). *Voorlopige uitkomsten van voortgezet onderzoek naar de gemiddelde zeeniveaus in de Nederlandse kustwateren*. Nota WW-WH 84.08.
- Van Marion, B.B., (1999). *Zandbalansen van het zeegat van Texel met het invers sedimenttransport model Texel*. RIKZ-99-116X.

- Van Rijn, L.C., (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam.
- Van Rijn, L.C., Ribberink, J.C., Reniers, A., Zitman, T., (1994). Yearly-averaged sand transport at the -20 and -8m NAP depth contours of JARKUS-profiles 14, 40, 76 and 103. Report H1887. Delft Hydraulics, Delft.
- Van Rijn, L.C., (1995a). Sand budget and coastline change of the Central Dutch Coast between Den Helder and Hoek van Holland. Delft Hydraulics, report H2129, Project Kustgenese.
- Van Rijn, L.C., Ribberink, J.C., Reniers, A., Zitman, T., (1995b). Yearly-averaged sand transport at the -20m and -8m NAP depth contours of Jarkus-profiles 14, 40, 76 en 103. Delft Hydraulics, report H1887, Project Kustgenese.
- Van Rijn, L.C., (1997), Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. Coastal Engineering 32, pp 61-90
- Van Rijn, L.C., Ruessink, B.G., Mulder, J.P.M.,(2002). COAST 3D- Egmond; The behaviour of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons. Process knowledge and guidelines for coastal management.
- Van Vessem, P., Stolk, A., (1990). Sand budget of the Dutch coast. 22nd Int. Conf. Coastal Eng. Delft. The Netherlands. ASCE, pp 1895-1908.
- Verhagen, H.J., (1989). Sand waves along the Dutch coast. Coastal Engineering 13, pp129-147
- Visser, M., (1993). On the transport of fine marine sediment in the Netherlands coastal zone. PH.D. Thesis, Universiteit Utrecht.
- Wiersma, J., (1991). De ontwikkeling van de Hollandse kust; een kwestie van schaal. Grondboor en Hamer, Vol.november 1991, pp 129-134.
- Wijnberg, K.M., (1995). Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades. Ph.D. Thesis, Utrecht University, Utrecht. The Netherlands.
- Wijnberg, K.M., Terwindt, J.H.J., (1995). Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis. Marine Geology 126, pp 301-330.
- Wijnberg, K.M., (1997). On the systematic offshore decay of breaker bars. 25th Int. Conf. Coast. Eng. ASCE, New York, pp 3600-3613.
- Wijnberg, K.M., (2002). Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Holland coast. Marine Geology 189, pp227-247.

Websites:

<http://www.getij.nl/>
<http://www.golfklimaat.nl/>
<http://www.knmi.nl/samenw/hydra>
<http://flyland.wldelft.nl/>

BIJLAGEN

Bijlage 1: Overzicht zandsuppleties en baggervolumes Hollandse kust in de periode 1953-2001

locatie	jaar	gebied		type	volume [m ³]
		begin	eind		
Scheveningen	1953	100.5	101.5	strandsuppletie	70.000
IJmuiden	1962-1967	57	57	strandsuppletie	1.500.000
Scheveningen	1969	100	101.5	strandsuppletie	45.000
Hoek van Holland	1971	115.7	118.75	strandsuppletie	18.940.000
Scheveningen	1975	98.5	101.5	strandsuppletie	700.000
Callantssoog	1976	12.975	13.75	duinverzwaring	342.000
Hoek van Holland	1976	115.7	119	strandsuppletie	1.500.000
Hoek van Holland	1977	115.7	118.75	strandsuppletie	870.000
Callantssoog	1979	11.15	12.8	duinverzwaring	470.000
Scheveningen	1981	99	101	strandsuppletie	10.000
Scheveningen	1982	99	101	strandsuppletie	15.400
Scheveningen	1985	98.75	101.25	banket	80.000
Scheveningen	1985	98.75	101.25	strandsuppletie	250.000
Callantssoog	1986	11.75	12.05	duinverzwaring	77.913
Callantssoog	1986	10.825	13.725	strandsuppletie	1.242.434
Ter Heijde	1986	107.73	115.61	strandsuppletie	1.900.000
Zwanenwater	1987	14.7	17.84	duinverzwaring	155.000
Zwanenwater	1987	13.755	18.1	strandsuppletie	1.695.000
Scheveningen	1987	99	101	strandsuppletie	8.000
Hoek van Holland	1988	118	118.5	strandsuppletie	200.000
Hoek van Holland	1989	118	118	strandsuppletie	100.000
Bergen aan Zee	1990	32.25	33.75	banket	60.000
Egmond	1990	37	38.5	strandsuppletie	323.318
Bergen aan Zee	1990	32.25	33.75	strandsuppletie	385.774
Bloemendaal	1990	62	63.25	strandsuppletie	261.682
Hoek van Holland	1990	117.75	118.75	strandsuppletie	183.000
Petten	1991	18	20.18	strandsuppletie	371.418
Callantssoog	1991	11	14	strandsuppletie	538.404
Scheveningen	1991	97.81	101.39	strandsuppletie	1.005.699
Hoek van Holland	1991	117.75	118.75	strandsuppletie	223.000
Egmond	1992	37.65	38.6	strandsuppletie	69.225
Egmond-Camperduin	1992	26.2	38.5	strandsuppletie	1.472.640
Hoek van Holland	1992	117.75	118.75	strandsuppletie	560.000
Den Helder	1993	1	7.5	strandsuppletie	615.527
Den Helder	1993	3.28	5.68	strandsuppletie	280.000
Hoek van Holland	1993	114	118.75	strandsuppletie	463.000
Ter Heijde	1993	106.23	112.21	strandsuppletie	1.143.000
Egmond	1994	37.85	38.2	strandsuppletie	106.343
Bergen aan Zee	1994	32.9	33.5	strandsuppletie	100.683
Bloemendaal	1994	60.5	63.35	strandsuppletie	255.076
Wassenaar	1994	94.25	96.25	strandsuppletie	700.000
Zandvoort	1994	65	67.3	strandsuppletie	334.147
Hoek van Holland	1994	117.75	118.75	strandsuppletie	200.000
Petten	1995	18.8	20.4	strandsuppletie	361.740
Bergen aan Zee	1995	32.625	33.625	strandsuppletie	306.000
Egmond	1995	37.25	38.75	strandsuppletie	306.000
Zwanenwater	1995	16.24	17.6	strandsuppletie	306.840
Hoek van Holland	1995	117.75	118.75	strandsuppletie	200.000
Ter Heijde	1995	112.21	114.5	strandsuppletie	300.000
Den Helder	1996	1.5	7.5	strandsuppletie	867.000
Zijpe	1996	10.01	12.13	strandsuppletie	459.000
Callantssoog	1996	12.2	14.1	strandsuppletie	459.000

Heemskerk	1996	50.425	51	strandsuppletie	180.050
Wassenaar	1996	91	93.5	strandsuppletie	500.000
Scheveningen	1996	97	101	strandsuppletie	800.000
Hoek van Holland	1996	117.75	118.75	strandsuppletie	200.000
Heemskerk	1997	49.65	50.425	strandsuppletie	304.450
Egmond	1997	36.25	38.8	strandsuppletie	314.000
Bergen-Egmond	1997	34.5	35.75	strandsuppletie	158.000
Schoorl	1997	26	30.05	strandsuppletie	547.000
Wassenaar	1997	94	96.5	strandsuppletie	552.800
Ter Heijde	1997	107.5	112.5	strandsuppletie	834.000
Ter Heijde	1997	113.15	114.85	onderwatersuppletie	1.028.950
Hoek van Holland	1997	117.75	118.75	strandsuppletie	200.000
Zijpe	1998	19.25	20.5	strandsuppletie	228.901
Bergen aan Zee	1998	31.05	33.5	strandsuppletie	352.000
Egmond	1998	37.5	38.75	strandsuppletie	244.442
Katwijk	1998	87.5	89.5	onderwatersuppletie	753.350
Noordwijk	1998	80.5	83.5	onderwatersuppletie	1.266.028
Bloemendaal-Zandvoort	1998	61.5	67.5	strandsuppletie	193.378
Bergen aan Zee	1999	32.5	33.75	strandsuppletie	205.793
Egmond	1999	37.25	38.75	strandsuppletie	214.515
Callantsoog	1999	10	14	strandsuppletie	144.000
Egmond	1999	36.9	39.1	onderwatersuppletie	880.100
Julianadorp	1999	3.95	6.28	strandsuppletie	287.480
Hoek van Holland	1999	117.75	118.5	Strandsuppletie	200.680
Scheveningen	1999	97.73	100.5	onderwatersuppletie	1.425.780
Bergen aan Zee	2000	32.75	33.25	strandsuppletie	225.000
Egmond	2000	38	38.8	strandsuppletie	207.445
Zwanenwater	2000	16.26	16.88	strandsuppletie	120.000
Bergen aan Zee	2000	32.25	34.25	onderwatersuppletie	994.000
Hoek van Holland	2000	117.5	118.5	strandsuppletie	200.000
Den Helder	2001	1.5	5.68	strandsuppletie	1.290.240
Bergen	2001	28.32	30	strandsuppletie	511.127
Zijpe	2001	11.08	14.01	onderwatersuppletie	1.499.940
Zandvoort	2001	66.25	67.5	strandsuppletie	248.093
Bloemendaal	2001	61.5	64.5	strandsuppletie	3.438.268
Zandvoort	2001	66.25	67.5	strandsuppletie	248.093
Bloemendaal	2001	61.5	64.5	strandsuppletie	3.438.268
Hoek van Holland	2001	117.5	118.5	strandsuppletie	200.000
Kijkduin-Ter Heijde	2001	108	112	strandsuppletie	801.178
Kijkduin-Ter Heijde	2001	107.4	112.5	onderwatersuppletie	3.581.899

Tabel 1-1: Overzicht zandsuppleties Hollandse kust 1953-2001

locatie	jaar	volume [m ³]
IJ-geul	1967	1.500.000
IJ-geul	1990	260.000
IJ-geul	1993	500.000
IJ-geul	1994	250.000
IJ-geul	1994	350.000
IJ-geul	1996	470.000

Tabel 1-2: Overzicht baggervolumes IJgeul 1967-1996

Bijlage 2: Golfhoogte en -periodeverdeling per windrichting

Eierlandse Gat

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 15.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	2.242	1.418	0.506	0.259	0.208	0.240	0.320	0.568	1.116	1.149	1.524	1.963	11.512
0.5 - 1.0	4.876	3.413	1.765	0.778	0.551	0.601	0.869	2.732	3.617	2.525	2.864	4.337	28.928
1.0 - 1.5	4.016	1.861	1.226	0.580	0.357	0.278	0.591	2.830	3.221	2.354	2.656	4.175	24.146
1.5 - 2.0	2.125	0.882	0.591	0.180	0.083	0.088	0.241	1.955	2.580	1.751	1.894	2.973	15.343
2.0 - 2.5	0.945	0.370	0.292	0.062	0.006	0.025	0.076	1.228	1.781	1.330	1.189	1.818	9.122
2.5 - 3.0	0.408	0.134	0.077	0.009	0.004	0.010	0.037	0.665	1.097	0.744	0.757	1.104	5.047
3.0 - 3.5	0.168	0.065	0.009	0.001	0.004	0.003	0.022	0.263	0.696	0.509	0.493	0.616	2.851
3.5 - 4.0	0.077	0.013	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.121	0.299	0.281	0.301	0.387	1.485
4.0 - 4.5	0.030	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.131	0.204	0.201	0.208	0.800
4.5 - 5.0	0.018	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003	0.051	0.109	0.095	0.115	0.393
5.0 - 5.5	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.015	0.068	0.046	0.055	0.202
5.5 - 6.0	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.037	0.021	0.028	0.097
6.0 - 6.5	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.019	0.016	0.012	0.055
6.5 - 7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.007	0.012
7.0 - 7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003
>7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
totaal	14.924	8.160	4.467	1.870	1.217	1.247	2.160	10.392	14.617	11.081	12.063	17.803	100.000

Tabel 2-1: Golfrichting afhankelijke simultane kansverdeling van Hm0 bij meetpost Eierlandse Gat

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 15.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	3.963	3.704	3.552	3.468	3.555	3.565	3.538	3.491	3.618	3.776	3.952	4.183	3.835
0.5 - 1.0	4.595	4.134	3.92	3.764	3.801	3.809	3.843	3.853	4.012	4.15	4.402	4.771	4.249
1.0 - 1.5	5.09	4.609	4.381	4.245	4.204	4.405	4.377	4.316	4.465	4.606	4.787	5.156	4.715
1.5 - 2.0	5.376	5.061	4.848	4.712	4.555	4.776	4.833	4.782	4.877	4.964	5.14	5.435	5.089
2.0 - 2.5	5.687	5.519	5.321	5.219	5.9	5.347	5.275	5.219	5.283	5.372	5.504	5.732	5.458
2.5 - 3.0	6.092	5.881	5.842	5.667	6.133	5.871	5.632	5.585	5.648	5.737	5.889	6.094	5.832
3.0 - 3.5	6.422	6.361	6.533	6.5	6.567	6	6.067	5.896	6.016	6.09	6.241	6.497	6.196
3.5 - 4.0	6.794	6.789	7.3	0	5.8	0	6.8	6.273	6.357	6.43	6.543	6.81	6.547
4.0 - 4.5	7.17	6.7	0	0	0	0	0	6.747	6.735	6.756	6.929	7.228	6.934
4.5 - 5.0	7.508	0	0	0	7.7	0	7.2	7.25	7.112	7.159	7.272	7.526	7.306
5.0 - 5.5	7.94	0	0	0	0	7.1	0	7.5	7.3	7.461	7.565	7.886	7.621
5.5 - 6.0	8.35	0	0	0	0	0	0	0	7.78	7.78	7.929	8.284	7.977
6.0 - 6.5	8.5	0	0	0	0	0	0	0	7.925	7.946	8.2	8.75	8.208
6.5 - 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	8.92	8.687
7.0 - 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.5	8.9	8.7
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.8	9.8
totaal	4.9	4.382	4.259	4.023	3.965	4.021	4.165	4.495	4.697	4.854	4.966	5.259	4.769

Tabel 2-2: Corresponderende gemiddelde waarden van Tm02 in [s] bij meetpost Eierlandse Gat

Europoort

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 15.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	2.242	1.418	0.506	0.259	0.208	0.240	0.320	0.568	1.116	1.149	1.524	1.963	11.512
0.5 - 1.0	4.876	3.413	1.765	0.778	0.551	0.601	0.869	2.732	3.617	2.525	2.864	4.337	28.928
1.0 - 1.5	4.016	1.861	1.226	0.580	0.357	0.278	0.591	2.830	3.221	2.354	2.656	4.175	24.146
1.5 - 2.0	2.125	0.882	0.591	0.180	0.083	0.088	0.241	1.955	2.580	1.751	1.894	2.973	15.343
2.0 - 2.5	0.945	0.370	0.292	0.062	0.006	0.025	0.076	1.228	1.781	1.330	1.189	1.818	9.122
2.5 - 3.0	0.408	0.134	0.077	0.009	0.004	0.010	0.037	0.665	1.097	0.744	0.757	1.104	5.047
3.0 - 3.5	0.168	0.065	0.009	0.001	0.004	0.003	0.022	0.263	0.696	0.509	0.493	0.616	2.851
3.5 - 4.0	0.077	0.013	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.121	0.299	0.281	0.301	0.387	1.485
4.0 - 4.5	0.030	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.131	0.204	0.201	0.208	0.800
4.5 - 5.0	0.018	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003	0.051	0.109	0.095	0.115	0.393
5.0 - 5.5	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.015	0.068	0.046	0.055	0.202
5.5 - 6.0	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.037	0.021	0.028	0.097
6.0 - 6.5	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.019	0.016	0.012	0.055
6.5 - 7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.007	0.012
7.0 - 7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003
>7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
totaal	14.924	8.160	4.467	1.870	1.217	1.247	2.160	10.392	14.617	11.081	12.063	17.803	100.000

Tabel 2-3: Golfrichting afhankelijke simultane kansverdeling van Hm0 bij meetpost Europoort

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 15.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	3.963	3.704	3.552	3.468	3.555	3.565	3.538	3.491	3.618	3.776	3.952	4.183	3.835
0.5 - 1.0	4.595	4.134	3.92	3.764	3.801	3.809	3.843	3.853	4.012	4.15	4.402	4.771	4.249
1.0 - 1.5	5.09	4.609	4.381	4.245	4.204	4.405	4.377	4.316	4.465	4.606	4.787	5.156	4.715
1.5 - 2.0	5.376	5.061	4.848	4.712	4.555	4.776	4.833	4.782	4.877	4.964	5.14	5.435	5.089
2.0 - 2.5	5.687	5.519	5.321	5.219	5.9	5.347	5.275	5.219	5.283	5.372	5.504	5.732	5.458
2.5 - 3.0	6.092	5.881	5.842	5.667	6.133	5.871	5.632	5.585	5.648	5.737	5.889	6.094	5.832
3.0 - 3.5	6.422	6.361	6.533	6.5	6.567	6	6.067	5.896	6.016	6.09	6.241	6.497	6.196
3.5 - 4.0	6.794	6.789	7.3	0	5.8	0	6.8	6.273	6.357	6.43	6.543	6.81	6.547
4.0 - 4.5	7.17	6.7	0	0	0	0	0	6.747	6.735	6.756	6.929	7.228	6.934
4.5 - 5.0	7.508	0	0	0	7.7	0	7.2	7.25	7.112	7.159	7.272	7.526	7.306
5.0 - 5.5	7.94	0	0	0	0	7.1	0	7.5	7.3	7.461	7.565	7.886	7.621
5.5 - 6.0	8.35	0	0	0	0	0	0	0	7.78	7.78	7.929	8.284	7.977
6.0 - 6.5	8.5	0	0	0	0	0	0	0	7.925	7.946	8.2	8.75	8.208
6.5 - 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.3	8.92	8.687
7.0 - 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.5	8.9	8.7
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.8	9.8
totaal	4.9	4.382	4.259	4.023	3.965	4.021	4.165	4.495	4.697	4.854	4.966	5.259	4.769

Tabel 2-4: Corresponderende gemiddelde waarden van Tm02 in [s] bij meetpost Europoort

Meetpost Noordwijk

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 15.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	2.242	1.418	0.506	0.259	0.208	0.240	0.320	0.568	1.116	1.149	1.524	1.963	11.512
0.5 - 1.0	4.876	3.413	1.765	0.778	0.551	0.601	0.869	2.732	3.617	2.525	2.864	4.337	28.928
1.0 - 1.5	4.016	1.861	1.226	0.580	0.357	0.278	0.591	2.830	3.221	2.354	2.656	4.175	24.146
1.5 - 2.0	2.125	0.882	0.591	0.180	0.083	0.088	0.241	1.955	2.580	1.751	1.894	2.973	15.343
2.0 - 2.5	0.945	0.370	0.292	0.062	0.006	0.025	0.076	1.228	1.781	1.330	1.189	1.818	9.122
2.5 - 3.0	0.408	0.134	0.077	0.009	0.004	0.010	0.037	0.665	1.097	0.744	0.757	1.104	5.047
3.0 - 3.5	0.168	0.065	0.009	0.001	0.004	0.003	0.022	0.263	0.696	0.509	0.493	0.616	2.851
3.5 - 4.0	0.077	0.013	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.121	0.299	0.281	0.301	0.387	1.485
4.0 - 4.5	0.030	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.131	0.204	0.201	0.208	0.800
4.5 - 5.0	0.018	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003	0.051	0.109	0.095	0.115	0.393
5.0 - 5.5	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.015	0.068	0.046	0.055	0.202
5.5 - 6.0	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.037	0.021	0.028	0.097
6.0 - 6.5	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.019	0.016	0.012	0.055
6.5 - 7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.007	0.012
7.0 - 7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003
>7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
totaal	14.924	8.160	4.467	1.870	1.217	1.247	2.160	10.392	14.617	11.081	12.063	17.803	100.000

Tabel 2-5: Golfrichting afhankelijke simultane kansverdeling van Hm0 bij meetpost Noordwijk

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal	
	345.00 - 375.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00		345.00 - 375.00
0 - 0.5	3.685	3.42	3.174	3.018	3.003	3.238	3.38	3.436	3.517	3.68	3.97	4.096	3.685	3.737
0.5 - 1.0	4.068	3.667	3.357	3.181	3.165	3.389	3.676	3.77	3.888	4.087	4.423	4.641	4.068	4.14
1.0 - 1.5	4.393	4.05	3.955	3.719	4.55	4.397	4.312	4.286	4.393	4.517	4.76	4.855	4.393	4.556
1.5 - 2.0	4.811	4.528	4.3	4.9	5.12	4.75	4.71	4.74	4.856	4.967	5.102	5.161	4.811	4.966
2.0 - 2.5	5.202	5.187	0	5	5.3	5.15	5.065	5.188	5.276	5.39	5.501	5.613	5.202	5.396
2.5 - 3.0	5.767	5.7	4.9	0	0	5.4	5.55	5.613	5.673	5.81	5.919	6.036	5.767	5.833
3.0 - 3.5	6.225	0	0	0	0	6.45	0	6	6.001	6.251	6.296	6.431	6.225	6.24
3.5 - 4.0	0	0	0	6.3	0	6.25	0	6.1	6.478	6.53	6.66	6.805	0	6.628
4.0 - 4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	6.746	6.919	6.936	7.214	0	6.977
4.5 - 5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.02	7.118	7.347	7.414	0	7.269
5.0 - 5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	7.6	7.436	7.662	7.955	0	7.662
5.5 - 6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.8	7.4	0	8.45	0	8.167
6.0 - 6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5 - 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.0 - 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
totaal	4.036	3.629	3.31	3.131	3.102	3.395	3.738	3.977	4.429	4.413	4.63	4.707	4.036	4.366

Tabel 2-6: Corresponderende gemiddelde waarden van Tm02 in [s] bij meetpost Noordwijk

Meetpost IJmuiden

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 15.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	2.242	1.418	0.506	0.259	0.208	0.240	0.320	0.568	1.116	1.149	1.524	1.963	11.512
0.5 - 1.0	4.876	3.413	1.765	0.778	0.551	0.601	0.869	2.732	3.617	2.525	2.864	4.337	28.928
1.0 - 1.5	4.016	1.861	1.226	0.580	0.357	0.278	0.591	2.830	3.221	2.354	2.656	4.175	24.146
1.5 - 2.0	2.125	0.882	0.591	0.180	0.083	0.088	0.241	1.955	2.580	1.751	1.894	2.973	15.343
2.0 - 2.5	0.945	0.370	0.292	0.062	0.006	0.025	0.076	1.228	1.781	1.330	1.189	1.818	9.122
2.5 - 3.0	0.408	0.134	0.077	0.009	0.004	0.010	0.037	0.665	1.097	0.744	0.757	1.104	5.047
3.0 - 3.5	0.168	0.065	0.009	0.001	0.004	0.003	0.022	0.263	0.696	0.509	0.493	0.616	2.851
3.5 - 4.0	0.077	0.013	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.121	0.299	0.281	0.301	0.387	1.485
4.0 - 4.5	0.030	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.131	0.204	0.201	0.208	0.800
4.5 - 5.0	0.018	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003	0.051	0.109	0.095	0.115	0.393
5.0 - 5.5	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.015	0.068	0.046	0.055	0.202
5.5 - 6.0	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.037	0.021	0.028	0.097
6.0 - 6.5	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.019	0.016	0.012	0.055
6.5 - 7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.007	0.012
7.0 - 7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003
>7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003
totaal	14.924	8.160	4.467	1.870	1.217	1.247	2.160	10.392	14.617	11.081	12.063	17.803	100.000

Tabel 2-7: Golfrichting afhankelijke simultane kansverdeling van Hm0 bij meetpost IJmuiden

golfhoogte (m)	golfrichting (graden)												totaal
	345.00 - 375.00	15.00 - 45.00	45.00 - 75.00	75.00 - 105.00	105.00 - 135.00	135.00 - 165.00	165.00 - 195.00	195.00 - 225.00	225.00 - 255.00	255.00 - 285.00	285.00 - 315.00	315.00 - 345.00	
0 - 0.5	3.903	3.534	3.474	3.435	3.435	3.374	3.453	3.51	3.609	3.751	3.911	4.19	3.777
0.5 - 1.0	4.486	3.983	3.836	3.776	3.598	3.62	3.726	3.833	3.957	4.101	4.336	4.764	4.182
1.0 - 1.5	4.902	4.387	4.265	4.141	4.024	4.055	4.187	4.293	4.397	4.498	4.699	5.079	4.588
1.5 - 2.0	5.191	4.801	4.666	4.562	4.455	4.588	4.647	4.752	4.838	4.896	5.058	5.361	4.964
2.0 - 2.5	5.613	5.277	5.083	4.958	5.014	4.933	5.027	5.14	5.269	5.315	5.438	5.696	5.363
2.5 - 3.0	5.986	5.8	5.481	5.2	5.825	5.557	5.51	5.534	5.615	5.731	5.804	6.074	5.74
3.0 - 3.5	6.551	6.2	6.1	6.5	0	6.25	5.688	5.913	6.025	6.053	6.172	6.514	6.161
3.5 - 4.0	6.818	6.25	6.2	0	0	6	6.18	6.223	6.364	6.387	6.525	6.854	6.529
4.0 - 4.5	7.268	6.3	0	0	0	6.85	0	6.647	6.68	6.784	6.915	7.171	6.905
4.5 - 5.0	7.65	0	0	0	0	0	0	7.025	7.084	7.071	7.336	7.629	7.336
5.0 - 5.5	7.963	0	0	0	0	0	0	0	7.29	7.372	7.5	8.007	7.646
5.5 - 6.0	8.4	0	0	0	0	0	0	0	7.65	7.68	7.937	8.125	7.995
6.0 - 6.5	9.2	0	0	0	0	0	0	0	8.2	7.94	8.033	8.571	8.306
6.5 - 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.25	0	0	9.25	8.75
7.0 - 7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.967	8.967
>7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
totaal	4.695	4.154	4.053	3.903	3.746	3.744	3.998	4.448	4.657	4.665	4.792	5.106	4.61

Tabel 2-8: Corresponderende gemiddelde waarden van Tm02 in [s] bij meetpost IJmuiden

Bijlage 3: Transport formules

bodemtransport Ribberink:

$$q_{s,bodem} = m_{rib} \sqrt{(s-1)gd^3} \left[(|\Psi(t)| - \Psi_{cr})^{n_{rib}} \frac{\Psi(t)}{|\Psi(t)|} \right] \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

waarin:

$$\Psi(t) = \frac{0.5 f_{cw} |u(t)| u(t)}{(s-1)gd}$$

suspensietransport Van Rijn:

$$q_{s,suspensie} = 0.012 \frac{\bar{u} - \bar{u}_{cr}}{((s-1)gd_{50})^{0.5}} \left(\frac{d_{50}}{h} \right) \left(\frac{1}{D_*} \right)^{0.6} (\bar{u}h) \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

formule van Bailard:

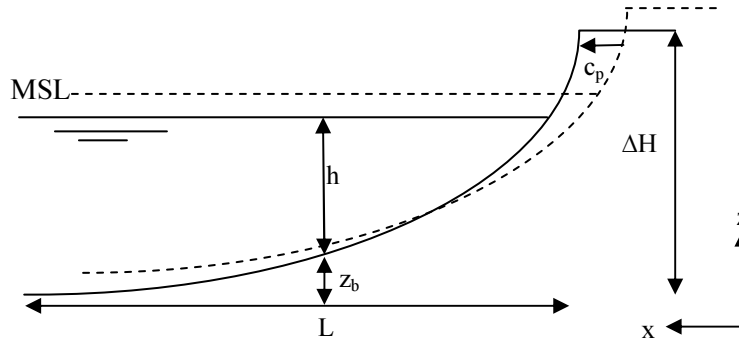
$$q_s = \frac{0.5 f_w}{g(s-1)} \left(\frac{\varepsilon_b}{\tan \phi} |u|^2 u + \frac{\varepsilon_s}{W_s} |u|^3 u \right) \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

Bijlage 4: Afleiding formules Stive en Eysink

Uitwerking balansvergelijking voor dynamisch kustprofiel (actieve zone):

Aannamen:

Het profiel is in eerste benadering vormvast en behoudt in verticale zin zijn relatieve positie t.o.v. MSL. De horizontale verplaatsingsnelheid (c_p) van het profiel wordt bepaald door de sedimentbalans.



Vormvast profiel en MSL volgend (Bruun, 1962):

$$\rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} + c_p \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad , \text{via } h = \text{MSL} - z_b$$

$$\rightarrow \frac{\partial z_b}{\partial t} + c_p \frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{\partial \text{MSL}}{\partial t}$$

(c_p = horizontale verplaatsingsnelheid profiel)

Uit de sedimentbalans vergelijking volgt:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + s = 0$$

$$\rightarrow c_p = -\frac{\partial \text{MSL}}{\partial t} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1} - \frac{\partial q_x}{\partial h} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1} - s \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1}$$

of na integratie over het profiel (L , ΔH):

$$c_p = -\frac{\partial \text{MSL}}{\partial t} \frac{L}{\Delta H} + \frac{(q_{x|zee} - q_{x|duin})}{\Delta H} + \left(\frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) (\Delta H)^{-1} + \frac{s}{\Delta H}$$

waarin: $q_{x,y}$ = dwars-, langstransport p.e.v. breedte
 Q_y = langstransport geïntegreerd over actieve zonenlengte L
 s = bronterm (bv. duinvorming) p.e.v. breedte

Als er geen transportgradiënten en brontermen zijn dan blijft over:

$$c_p = -\frac{\partial \text{MSL}}{\partial t} (\tan \beta)^{-1} = -\frac{\partial \text{MSL}}{\partial t} \left(\frac{\Delta H}{L} \right)^{-1}$$

Bijlage 5: Kwantitatieve vergelijking Stive en Van Rijn

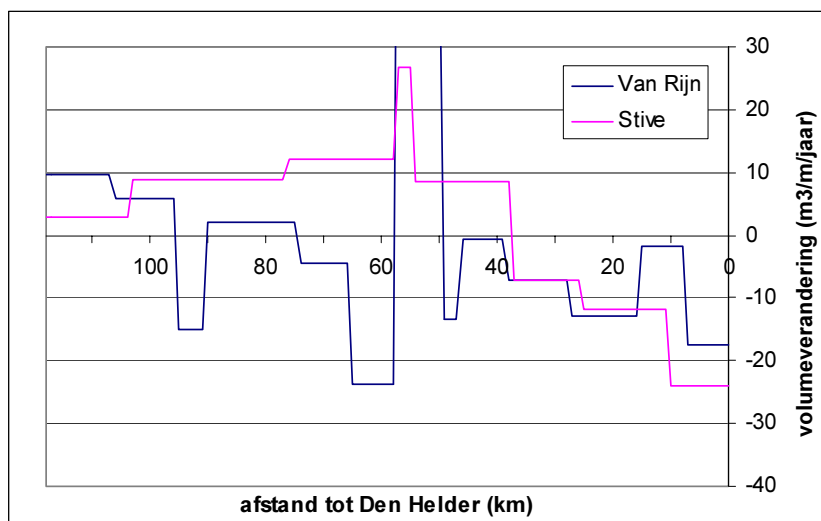
van Rijn	volume verandering (m3/jaar)					kustlijnverplaatsing (m/jaar)								
	begin	eind	langs	dwars-8	dwars+3	bron	bruun	totaal	langs	dwars-8	dwars+3	bron	bruun	totaal
0	7.2	-115000	10000	-20000	-20000	0	0	-125000	-0.89	0.08	-0.15	0.00	0	-0.96
7.2	15.35	-120000	15000	-20000	-20000	110000	0	-15000	-0.82	0.10	-0.14	0.75	0	-0.10
15.35	27.1	-195000	25000	-25000	-25000	45000	0	-150000	-0.92	0.12	-0.12	0.21	0	-0.71
27.1	38.1	-130000	50000	-25000	-25000	25000	0	-80000	-0.66	0.25	-0.13	0.13	0	-0.40
38.1	46.1	-35000	50000	-20000	-20000	0	0	-5000	-0.24	0.35	-0.14	0.00	0	-0.03
46.1	49.1	-90000	60000	-10000	-10000	0	0	-40000	-1.67	1.11	-0.19	0.00	0	-0.74
49.1	54.1	185000	100000	-30000	-30000	0	0	255000	2.06	1.11	-0.33	0.00	0	2.83
54.1	57.85	520000	-95000	-30000	-30000	0	0	395000	7.70	-1.41	-0.44	0.00	0	5.85
57.85	65.85	-210000	20000	-10000	-10000	10000	0	-190000	-1.46	0.14	-0.07	0.07	0	-1.32
65.85	74.85	-50000	20000	-10000	-10000	0	0	-40000	-0.31	0.12	-0.06	0.00	0	-0.25
74.85	89.85	25000	20000	-15000	-15000	0	0	30000	0.09	0.07	-0.06	0.00	0	0.11
89.85	94.85	-85000	15000	-5000	-5000	0	0	-75000	-0.94	0.17	-0.06	0.00	0	-0.83
94.85	105.9	-25000	50000	-10000	-10000	50000	0	65000	-0.13	0.25	-0.05	0.25	0	0.33
105.9	116.4	-175000	150000	-50000	-50000	175000	0	100000	-0.93	0.79	-0.26	0.93	0	0.53
		-500000	490000	-280000	-280000	415000	0	125000						

Stive	volume verandering (m3/jaar)					kustlijnverplaatsing (m/jaar)								
	begin	eind	langs	dwars-8	dwars+3	bron	bruun	totaal	langs	dwars-8	dwars+3	bron	bruun	totaal
0	10	-350000	120000	-10000	-10000	0	0	-240000	-1.52	0.52	-0.04	0	-0.07	-1.11
10	20	-300000	120000	-10000	-10000	0	0	-190000	-1.30	0.52	-0.04	0	-0.05	-0.88
26	37	-200000	132000	-11000	-11000	0	0	-79000	-0.87	0.52	-0.04	0	-0.07	-0.46
37	54	-25000	187000	-17000	-17000	0	0	145000	-0.10	0.44	-0.04	0	-0.08	0.22
54	57	80000	0	0	0	0	0	80000	1.07	0.00	0.00	0	0.00	1.07
57	76	40000	209000	-19000	-19000	0	0	230000	0.08	0.44	-0.04	0	-0.12	0.36
76	103	-30000	297000	-27000	-27000	0	0	240000	-0.05	0.48	-0.04	0	-0.11	0.28
103	118	-90000	150000	-15000	-15000	0	0	45000	-0.45	0.50	-0.05	0	-0.08	-0.08
		-875000	1215000	-109000	-109000	0	0	231000						

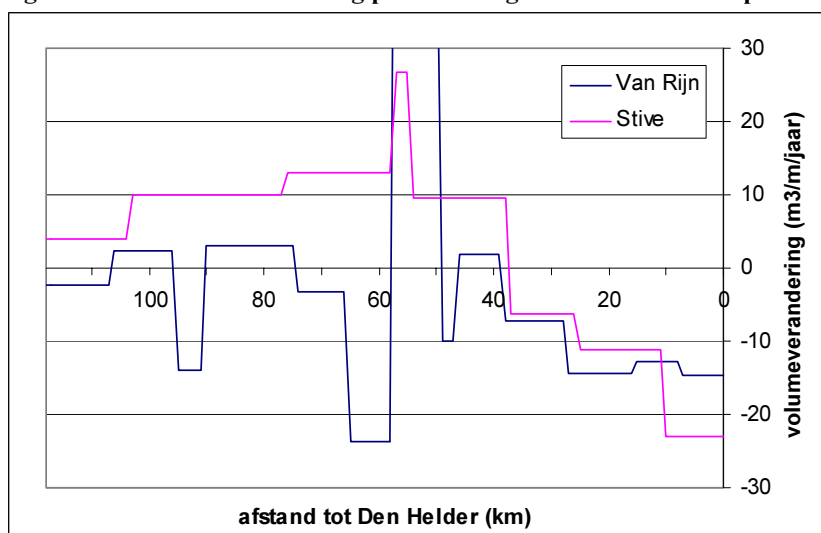
+ = kustlijnverplaatsing landwaarts
 - = kustlijnverplaatsing zeewaarts

+ = sedimentatie
 - = erosie
 volumeverandering sectie = kustlijnverplaatsing x ΔH x lengte kustsectie

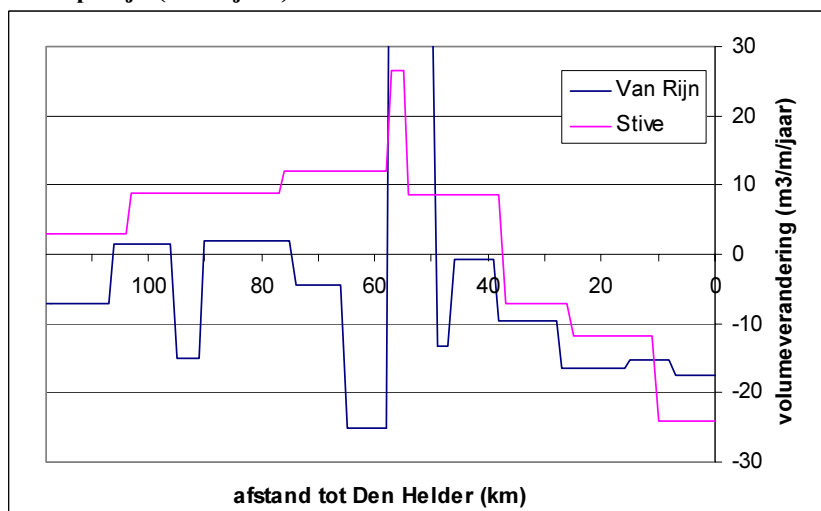
Bijlage 6: Vergelijking volumeveranderingen Stive en van Rijn



Figuur 6-1: Volumeverandering per meter t.g.v. alle beschouwde processen (m³/m/jaar)

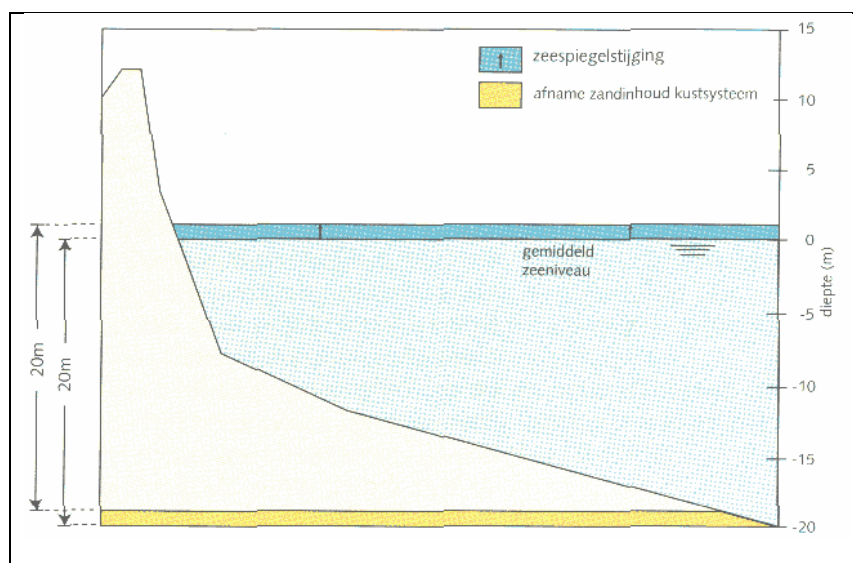


Figuur 6-2: Volumeverandering per meter t.g.v. langstransport en dwarstransport over de NAP -8m dieptelij (m³/m/jaar)



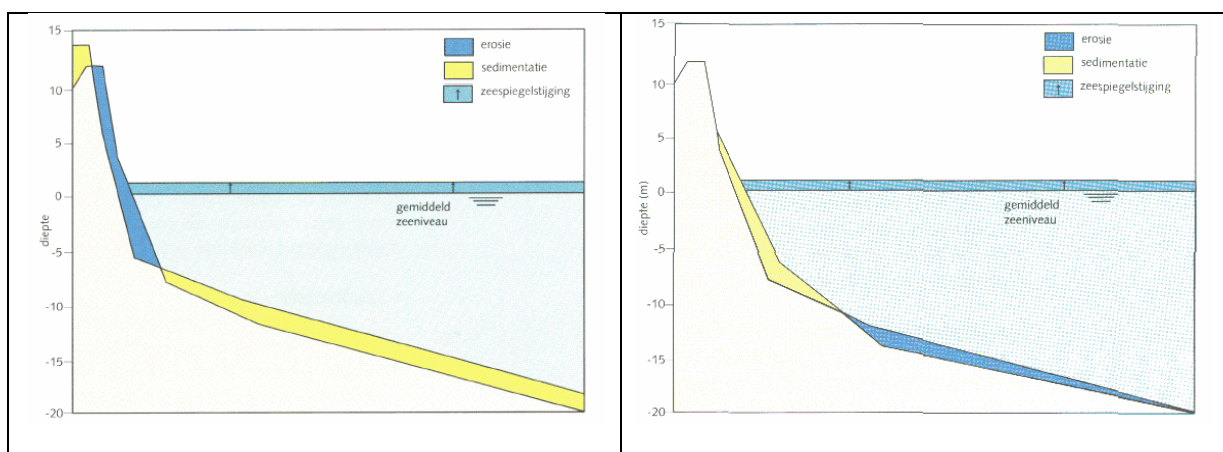
Figuur 6-3: Volumeverandering t.g.v. langstransport en dwarstransport over de NAP -8m en NAP +3m dieptelij (m³/m/jaar) (alle processen exclusief supplementies)

BIJLAGE 7: Zeespiegelrijzingseffect



Figuur 7-1: Direct effect van zeespiegelstijging op de zandinhoud van het kuststelsel

Een stijging van de zeespiegel heeft een direct effect op de zandbalans door de toename van de gemiddelde waterhoogte, en een indirect effect door de verandering in zandtransporterende processen. Het directe effect (zie Figuur 7-1) wordt duidelijk bij de beschouwing van de zandbalans van het kuststelsel over een periode van enkele tientallen jaren. Er wordt vanuit gegaan dat het kuststelsel uit een strook met een actieve ondergrens van NAP -20m en een bovengrens bij de duinen, zijn zandreserves kan halen. Door stijging van de zeespiegel komt een deel van deze reserves beneden de 20m dieptelijn te liggen, en daarmee buiten het bereik van de kust. Daardoor nemen de beschikbare reserves van de kust af.



Figuur 7-2: Effecten van de zeespiegelrijzing op het dwarsprofiel volgens Bruun (links) en Stive en de Vriend (rechts)

Het indirecte effect van de zeespiegelstijging op de zandbalans komt tot uiting in veranderingen in het zandtransport door golven en stroming. Deze veranderingen zijn zeer complex en kunnen zeer verschillende gevolgen hebben voor de zandbalans. Een gangbare theorie is de in het model van Stive gebruikte Bruun-regel (Bruun, 1962; Bruun, 1988). Deze theorie gaat ervan uit dat een complex aan processen, bij stijging van de zeespiegel leidt tot vormbehoud van het kustprofiel (Figuur 7-2). Resultaat hiervan is een zandverlies in de ondiepe, en zandwinst in de diepere kustzone; veranderingen die een duidelijk effect zouden hebben op het zandverlies in de ondiepe zone. Overheersend is echter een herverdeling van

het zand binnen het kuststelsel. Voor de zandbalans in het geheel lijken de effecten gering. Wel zouden een landwaartse verplaatsing van het kustprofiel, tot zandverliezen door verstuing via de wind kunnen leiden.

Een andere theorie (Stive en de Vriend, 1995) gaat ervan uit in tegenstelling tot Bruun, dat bij een stijging van de zeespiegel het ondiepe deel van de kust juist vooruit gaat, terwijl het diepe deel vervlakt en bijgevolg het middendeel versteilt (Figuur 7-2). Dit is opnieuw echter een verandering met mogelijk wel gevolgen voor het zandverlies in de ondiepe zone, maar nauwelijks voor de zandbalans van het kuststelsel. Herverdeling van het zand loodrecht op de kust blijft hierbij overheersend. Het is bij vergelijking van deze theorieën moeilijk aan te geven welke theorie het beste het effect van de zeespiegelrijzing beschrijft.

De grootste indirecte effecten van de zeespiegelstijging op de zandbalans komen tot stand door veranderingen van het zandtransport langs de kust. De hoofdoorzaak van deze veranderingen is de toename van de zandvraag door estuaria en met name de Waddenzee. Om mee te kunnen groeien met een stijgende zeespiegel hebben deze gebieden een evenredige hoeveelheid extra sediment nodig. Dit kan zowel zand als slib zijn. Hoe groot het resulterende verlies aan zand in de kustzone daadwerkelijk is, hangt af van de snelheid waarmee het Waddensysteem op de toegenomen sedimentbehoefte reageert, maar ook op de beschikbaarheid en afzettingssnelheid van zand en slib.

Verder moet nog genoemd worden dat er in de nabije toekomst steeds frequenter zware stromen en daarmee gepaard gaande hoge golven worden voorspeld. Wat het effect op de zandbalans hierdoor is, is nog onzeker.

BIJLAGE 8: Jaarlijks gemiddelde langtransport waarden in de brandingszone zonder en met de aanwezigheid van constructies (Van Rijn, 1995)

